

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES



TRABAJO FIN DE GRADO

**ESTUDIO ACÚSTICO DE UN RECINTO AL AIRE
LIBRE: PATIO AUDITORIO CASA DE LA
CULTURA DE SONSECA**

GRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS AUDIOVISUALES

Autor: Javier García Ruiz

Tutor: Luis Antonio Azpicueta Ruiz

ABSTRACT

The “Casa de la Cultura de Sonseca” auditorium was built to complement within a multipurpose venue but do not follow some basic acoustic guidelines. Therefore, this study tries to simulate the auditorium using acoustic simulation software and evaluate their basic acoustic properties. It should be noted that the considered acoustic space has a special property: it is an outdoor auditorium, what incorporates some novelty in this kind of simulations.

To carry on the acoustic simulation, it relies on the result of a test base on “in situ” measurement. With obtained data and created simulation, the acoustic performance of the building was reproduced showing its qualities, as the distribution of the Sound Presion Level, the reverberation time of the enclosure, the distribution of direct level, etc.

Finally, conclusions are obtained which show the result of the study.

RESUMEN

El patio auditorio “Casa de la Cultura de Sonseca” fue construido como complemento a un edificio multiusos y sin seguir unas líneas de construcción con un fin acústico determinado. Es por ello que, éste trabajo intenta simular el campo sonoro que se crea en el recinto utilizando un software de simulación acústica y evaluar sus propiedades acústicas básicas.

Cabe destacar que, el espacio acústico tiene una propiedad especial: es un auditorio al aire libre, hecho que incorpora algunas novedades a este tipo de simulaciones.

Para llevar a cabo la simulación acústica, hemos realizado un ensayo “in situ”. Junto con los valores medidos y el resultado de la simulación hemos conseguido representar el campo sonoro que se crea en el recinto. Como resultado de la simulación hemos obtenido valores de nivel de presión sonora, tiempo de reverberación del recinto, distribución del nivel directo, etc.

Finalmente, hemos analizado los resultados de la simulación del modelo y hemos obtenido unas conclusiones, dejando abiertas nuevas líneas de trabajo sobre aspectos relevantes del proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer el apoyo recibido durante este tiempo a todas las personas que han estado cerca de mí.

En primer lugar a mi tutor D. Luis Antonio Azpicueta Ruiz, que desde que le comenté mi idea me ha proporcionado toda su ayuda y apoyo en todo momento y me ha puesto todas las facilidades para la realización de este trabajo.

En segundo lugar a mi familia, sin los cuales no hubiera podido llegar hasta aquí. Agradecerles su apoyo durante todo este trabajo así como durante toda mi etapa en la universidad.

En tercer lugar a mis compañeros y amigos que siempre han estado dispuestos a colaborar conmigo y ayudarme en lo necesario, especialmente a Javier López.

Por último, agradecer al Ayuntamiento de Sonseca su colaboración concediéndome los permisos oportunos para la realización del ensayo.

Índice

0. Introducción y motivación	8
1. Historia de la Acústica.....	14
1.1 Acústica arquitectónica moderna.....	19
2. El sonido y su propagación	23
2.1 Frecuencia	24
2.2 SPL Sound Presion Level	25
2.3 Propagación	26
2.4 Reflexión, transmisión y difracción de las ondas sonoras.....	27
2.5 El campo sonoro en recintos	29
3. Teorías Acústicas.....	33
3.1 Teoría Estadística	34
3.2 Teoría Geométrica.....	35
3.3 Teoría Ondulatoria.....	35
3.4 Teoría Psicoacústica.....	37
4. Presentación de la Casa de la Cultura de Sonseca.....	39
5. Construcción del recinto con EASE	46
5.1 Construcción de la Casa de la Cultura de Sonseca.....	48
5.1.1.- Recopilación de datos necesarios.....	48
5.1.2.- Construcción del modelo.	50
5.1.3.- Materiales	59
6. Mediciones acústicas en el recinto real: Ensayos “in situ”	68
6.1 Medidas de tiempo de reverberación en el recinto:.....	68
6.2 Medidas de nivel de presión en el recinto:	73
6.3 “Modus operandi” del ensayo:	75
7. Ajuste del modelo.....	82
8. Resultados de la simulación	106
8.1 Ray tracing y primeras reflexiones	106
8.2 SPL total	109
8.4 Relación Campo Directo / Campo Reverberante.....	110
8.5 % ALCons	111
8.6 Tiempo de reverberación.....	112
9. Conclusiones y trabajos futuros	115
10. Bibliografía.....	120
11. Anexos.....	122

0. Introducción y motivación

El trabajo fin de grado que se desarrolla a continuación expone el estudio del comportamiento acústico de un recinto, concretamente el patio auditorio Casa de la Cultura de Sonseca. Este trabajo surge bajo la idea de realizar un estudio enmarcado en el área de la acústica, línea de estudio dentro del grado en Ingeniería de Sistemas Audiovisuales y una de las cuales me incitó a realizar este grado.

Elegido el marco, resulta interesante poder estudiar y simular el comportamiento de un campo acústico. Principalmente, por ser algo no tangible pero que podemos medir. En este caso concreto, el campo desarrollado en los recintos destinados a conciertos, representaciones teatrales, etc., que debe producir una sensación confortable (confort acústico) en los espectadores que disfrutan de la actuación.

Durante muchos años, ya desde la antigua Grecia y Roma, la acústica era considerada como un aspecto muy importante dentro de las edificaciones debido a no disponer de sistemas de refuerzo sonoro. Por ello, construían sus edificios siguiendo unas líneas dedicadas a mejorar el campo sonoro creado en el recinto, se emplazaban en las laderas de las colinas, en lugares poco ruidosos, se levantaba una pared detrás del escenario para reflejar la voz a la zona de la audiencia, etc.

Hoy en día existen muchos recintos dedicados a eventos como representaciones teatrales, conciertos, monólogos, etc., que no han sido construidos con unas consideraciones básicas y de confort en el aspecto acústico. Por ello, se ha decidido realizar el estudio de uno de estos recintos, el Patio Auditorio Casa de la Cultura de Sonseca.

El patio auditorio Casa de la Cultura de Sonseca es en un recinto destinado a los eventos anteriormente citados, y dispone de unas características propias. El recinto objeto de estudio está emplazado en el patio interior de un edificio cultural y es destacable su línea de construcción sin haber tenido en cuenta su finalidad actual.

¿Por qué el patio auditorio Casa de la Cultura de Sonseca? Debido a la adquisición de nuevos conocimientos en el área de la acústica, comencé a prestar atención a todo lo relacionado con este campo en el mundo cotidiano. El recinto Casa de la Cultura de Sonseca se encuentra situado en la localidad donde he crecido, y he asistido en él a una numerosa cantidad de eventos: conciertos de bandas de música, corales, representaciones teatrales, pregones, etc. Pero, me llamó la atención cuando llegó a mis oídos que el escenario y el patio convertidos en auditorio, había sido algo posterior a la idea inicial de construcción del recinto. Lo cual, me hizo prestar más atención al comportamiento del campo sonoro desarrollado en él.

A partir de este momento, si asistía a un evento en su interior, intentaba desplazarme cambiando mi posición para identificar el lugar de nivel más elevado, o dónde se escuchaba con mayor claridad, dónde era más inteligible el discurso de un ponente, etc. Incluso, intentaba identificar la procedencia del ruido externo que

afectaba a la representación en curso, por ejemplo, un coche en las calles contiguas, otro evento con refuerzo sonoro en las proximidades, etc.

Una vez llegado el momento de elegir el trabajo final de grado, con la idea clara de desarrollar un estudio en el área acústica y concretamente en acústica arquitectónica y sonorización, pensé en este recinto y sus características que lo hacen particular.

El recinto se conforma de un patio al aire libre con capacidad para unas 800 personas sentadas (audiencia), el patio esta delimitado en sus laterales por dos pasillos techados separados de la audiencia por una fachada arqueada y en la parte frontal se sitúa un escenario. El escenario dispone de una cubierta sujeta por un entramado de vigas de madera.

Teniendo en cuenta el atractivo de estas características y con el propósito de investigación en este tipo de recinto al aire libre, me decidí por su estudio.

El objetivo principal es esbozar un mapa donde se presenten los aspectos acústicos con los que cuenta el recinto. Mostrar la situación acústica actual donde podamos ver sus cualidades o carencias.

Para cumplir nuestro objetivo hemos utilizado el software de simulación acústica EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineer). EASE es una herramienta que nos ofrece una serie de parámetros de interés, calculados a través de la simulación, cálculo del tiempo de reverberación, mapping, visualización de primeras reflexiones, etc. Esta herramienta nos ha permitido la creación del recinto y la simulación de los parámetros del campo sonoro que se crea en su interior. El proceso de construcción del recinto, se ha basado en los planos reales y la reproducción detallada de las formas y materiales incluyendo sus propiedades acústicas, obteniendo finalmente una reproducción fiel del modelo a estudio dentro del software.

Con el propósito de conseguir un modelo simulado con unas características lo más próximas posibles a la realidad, hemos realizado un ensayo acústico con medidas reales dentro del recinto en Sonseca. Con este fin tuvimos que desplazarnos al mismo para la toma de medidas “in situ”. El protocolo del ensayo así como sus resultados se describen en los capítulos venideros.

Concretamente, con el objetivo de acercar el modelo simulado al real, se ha realizado un ajuste en el modelo. Apoyándonos en los resultados obtenidos en el ensayo, hemos podido retocar valores de absorción en los materiales de origen estándar impuestos en el modelo. Le hemos otorgado un carácter propio y los materiales se han convertido en particulares y concretos. Por tanto, el resultado final es un mayor compromiso de comportamiento del campo sonoro frente al modelo estándar inicial.

Una vez ajustado el modelo, se puede afirmar que el comportamiento del modelo simulado será similar al comportamiento del campo sonoro en el modelo real. Obteniendo los parámetros para la caracterización del campo sonoro creado en el

recinto, parámetros de distribución del SPL (Sound Pressure Level), SPL directo, tiempos de reverberación, parámetros de inteligibilidad, etc. Además, tenemos la posibilidad del estudio de nuevos elementos dentro del recinto simulado y su efecto en el campo sonoro.

La característica más destacable de este recinto es que no dispone de superficie techo, y este hecho, es el factor por excelencia que afecta a la propagación del campo sonoro en el interior del recinto. Además, cabe mencionar los efectos derivados que este hecho provoca, como la considerable variabilidad de las condiciones atmosféricas dentro del mismo.

Siendo la característica principal que estudiamos un recinto al aire libre, se ha tenido que simular este efecto. Para ello, hemos impuesto una superficie techo que cumple las condiciones de construcción del software pero con unas condiciones especiales, una absorción acústica total.

Por último, hemos obtenido unas conclusiones sobre el trabajo realizado y hemos abierto nuevas líneas de investigación sobre temas que han surgido durante este proyecto y consideramos de interesante estudio.

Cabe destacar que el recinto Casa de la Cultura de Sonseca no fue diseñado con un fin acústico definido y es por ello que presenta muchas carencias en este aspecto. El trabajo que a continuación se desarrolla trata de mostrar estas características y se ha conseguido realizar una simulación del recinto que esboza el comportamiento del campo acústico generado en él.

0. Introduction and motivation

The final degree project that I expound below sets out the study of acoustic behaviour of House of Culture Auditorium Sonseca. I intend to carry out a study within the field of acoustic, an area of degree of Engineering of Audio-Visual System.

Chosen the area, the idea of studying and simulating the behaviour of an acoustic area was attracting to me, mostly because it is not tangible but we can measure it. In this case, the principal actor is the developed field in the concert enclosures that should produce a comfortable feeling (acoustic comfort) on viewers.

For many years since ancient Greece and Rome, the acoustic was considered a very important aspect in building construction because there were no sound reinforcement systems. They built with architecture dedicated to improving the sound field created in the enclosure. They stayed in hillsides to avoid acoustic shadows and they put up a wall behind the stage for reflecting the voice to the audience.

Nowadays there are many venues dedicated to events such as plays, concerts, monologues, etc., that have not been built with basic considerations and acoustics comfort aspect. Therefore, we have decided to study one of these rooms: the “Casa de la Cultura de Sonseca” auditorium. The “Casa de la Cultura de Sonseca” consists on an enclosure that it intends for concerts, plays... and it has a series of characteristics. The place sites on a courtyard inside of a culture house. Without bearing in mind its current purpose, the construction line is outstanding.

Why “Casa de la Cultura de Sonseca” auditorium? I started studying some subjects related to acoustic at the university. That is one reason I decided to study this degree and I paid attention to issues related to this area. “Casa de la Cultura de Sonseca” sites on the village I grew up, and I attended many events at this place, such as concerts, choir, plays, opening speeches, etc. It was curious for me when I realized that the stage and the courtyard (it became auditorium later) were different from the initial idea of the enclosure, counting on the important characteristic of being an outdoor place. I paid too much attention to sound behavior developed in it.

When I attended some event at this place, I moved changing my position because I wanted to know where level was higher, where listened with more clearly, where speeches were more intelligible, etc., also I tried identifying the place where external noise listened inside.

When I had to choose a final degree project I thought in this enclosure and their so special characteristics, because I had a clear idea of developed a study according to the acoustic area and, concretely in architectural acoustic and sound system.

The place is made up of outdoor courtyard with a seating capacity of 800 people. The sides of courtyard are demarcated by two roof aisles that it is separated from the audience by a curved facade. The stage sites on the front and it has a deck that

it is held by a wooden beams framework. Bearing in mind the attraction of these characteristics, I decided on the study.

The goals are to sketch a map with the principal acoustics aspect of the venue. In this way, we can show the current acoustical situation where we can evaluate its qualities or deficiencies.

To achieve our goal, we used EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers) acoustic simulation software. EASE is a tool that offers a series of interesting factors that it has been calculated by simulation, calculation of the reverberation time, mapping, visualization of the first reflections, etc. This tool has allowed us to create an enclosure and the simulation of the parameters of the sound field that creates inside. The process of building the fence, was based on real plans and detailed reproduction of forms and materials, including their acoustic properties. Finally, we achieved a faithful copy of model inside software.

To play a commitment to the construction of reality, we have made an acoustic test with actual measurements within the enclosure in Sonseca. To make this, we had to go to the place for measuring “in situ”, describing the trial protocol and results in the coming chapters.

Specifically, we carried out an adjustment in the model. With the obtained results, we could change absorption values in original materials we used firstly. We gave it own character and materials become particular and specific. Therefore, the final result is a greater commitment of behaviour of sound field than the initial model.

After the model was regulated, we can say that the behaviour of simulated model will be similar to behaviour of sound field in the real model. Thanks to this, we could obtain the parameters to characterization of sound field that was created at the enclosure, parameters of distribution SPL and direct SPL, parameters of intelligibility, reverberation time, etc. Moreover, we have chance of studying new elements inside simulated enclosure and its effect in sound field.

The most prominent characteristic of this enclosure is that it has not surface like roof, and this fact is the factor that concerns the spread of the sonorous field inside the enclosure. In addition, it is necessary to mention the derivative effects that this fact provokes, like the considerable variability of the atmospheric conditions. We had to simulate this effect. For this, we have imposed a ceiling surface but with especial considerations, a total acoustic absorption.

Finally, we have obtained some conclusions of the work and we have proposed new work lines with topics that have arisen during this project and we have found interesting development.

It is important to say that, House of Culture Auditorium Sonseca wasn't designed with a well-defined acoustic purpose. This enclosure has a lot of lacks related to this aspect. The following study intends to show these characteristics. Also we could carry out a simulation of enclosure that outline the behaviour of acoustic field created in it.

1. Historia de la Acústica

Para comenzar con un breve análisis de la acústica arquitectónica referida principalmente a recintos con propósitos de ocio y con la principal característica de ser recintos al aire libre, debemos situarnos en la antigua Grecia y Roma, y dentro de éstas, en el ámbito teatral. Allí nos encontramos edificaciones construidas con unos propósitos claros y donde la acústica jugaba un papel fundamental a la hora de la construcción.

Los teatros griegos, en su origen, apenas tenían importancia. Sin embargo, fue en tiempo de Temístocles cuando comenzó a crecer en consideración llegando al nivel de que cada ciudad tenía su teatro, destacándose el construido en Atenas (480 años a. de J.C.) junto al templo de Baco, en la vertiente de la Acrópolis, con una capacidad para 30.000 espectadores.

El emplazamiento y la forma de estas construcciones venía condicionado, en gran parte, por cuestiones de tipo acústico. Su asentamiento se llevaba a cabo en las laderas de las colinas; la razón de esta determinación consistía no sólo en permitir una buena visión de la escena, sino también reducir el ruido de fondo e impedir sombras acústicas del sonido directo entre los espectadores. En cuanto a su estructura, uno de los aspectos más destacados es la introducción de la pared de fondo sobre la zona del teatro que comprendía gradas, escaleras y vomitorios, que además de disminuir la inmisión de ruidos exteriores y eliminar vistas innecesarias, hacía que el sonido procedente de los actores, tras reflejarse en ella, se dirigiese de nuevo hacia el público.

En el espacio libre, el único sonido que se propaga desde la fuente sonora hasta el receptor es el sonido directo. El nivel de presión sonora asociado al sonido directo disminuye a razón de 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Según experimentos realizados, la máxima distancia a la que puede ser oído un mensaje oral emitido en una zona extremadamente silenciosa (con ausencia total de viento) es de 42 m en la dirección frontal del orador, de 30 m lateralmente y de 17 m en la dirección posterior. A distancias superiores, el mensaje deja de ser inteligible, con independencia del lugar elegido para llevar a cabo la experiencia. [1]

En los teatros clásicos griegos se alcanzaban distancias sustancialmente mayores que las anteriormente mencionadas. En concreto en el teatro de Epiaduro (Grecia), construido alrededor del año 300 a.C. y actualmente conservado en buen estado, el asiento más alejado está situado a 70 m del escenario y la inteligibilidad en dicho punto es sorprendentemente buena.



Fig.1.1 Panorámica del teatro Epiaduro (Grecia)

La explicación de tal circunstancia radica principalmente en el hecho de que el teatro se hallaba ubicado en una zona con un ruido ambiental extremadamente bajo y que, además, el sonido directo que llegaba a cada punto se veía reforzado por la existencia de primeras reflexiones (con un retardo máximo de 50 ms respecto al sonido directo). Estas reflexiones se generaban en la plataforma circular altamente reflectante situada entre el escenario y las gradas, denominada “orquesta”.

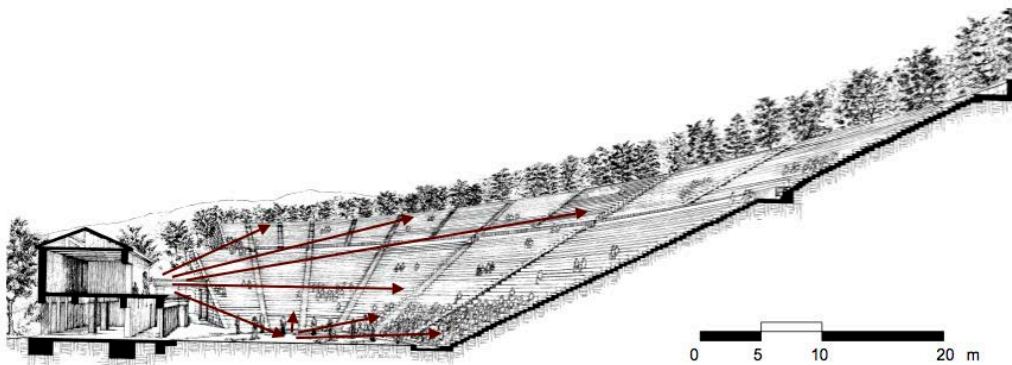


Fig.1.2 Teatro Epiaduro (Grecia) vista longitudinal

Desde un punto de vista teórico, la existencia de esta primera reflexión con la superficie reflectante generaba un incremento de 3 dB en el nivel de presión sonora. Esto daba lugar a un factor de aumento neto de la distancia límite de audición de $\sqrt{2}$. Por ello la distancia límite en la dirección frontal del actor pasaría a ser del orden de 60 m. A esta circunstancia debemos sumarle otros factores que influyen de manera importante como las reflexiones producidas por la pared posterior del escenario y las máscaras utilizadas por los actores (recubiertas interiormente de placas de bronce o piedra “calcophone”) que, además de acentuar las facciones de la cara, desempeñaban una función acústica al actuar a modo de

megáfono. Dichas circunstancias justifican el hecho de alcanzar los mencionados 70 m.

La forma típica de abanico abarcaba un arco de 210° , ello implica que tanto la visibilidad como las condiciones acústicas situadas a ambos extremos de la plataforma circular eran menos favorables que en el resto de las zonas.

Otra característica a destacar de los teatros griegos era la pronunciada pendiente de sus gradas, normalmente entre 20° y 34° . Estos elevados valores eran beneficiosos, tanto para conseguir una buena visual de la representación desde cualquier punto, como para la obtención de mayores ángulos de incidencia de los sonidos directo y reflejado. En el teatro de Epidauro, el círculo interior presentaba una pendiente de $26,2^\circ$ en el anillo interior y de $26,5^\circ$ en el anillo exterior. De esta manera el ángulo formado por el plano de las gradas y las diversas reflexiones sobre la plataforma circular era siempre mayor de 5° . Esta premisa era posible debido a que la altura del escenario no superaba los 3,5 m. El teatro de Epidauro acomodaba del orden de 14000 espectadores, unas diez veces mas la capacidad de los mayores teatros actuales.

Un ejemplo de construcción actual elaborada con la filosofía de construcción de los teatros griegos es el teatro de Waldbühne, Berlín, Alemania. Está formado por tres anillos concéntricos de 15° , 23° y 30° , respectivamente. [2]



Fig.1.3 Teatro Waldbühne, Berlín (Alemania)

Siguiendo con el análisis de la acústica arquitectónica y concretamente de teatros al aire libre nos situamos ahora en la antigüedad romana. Los teatros romanos gozaron de una grandeza y una suntuosidad superior a los de Grecia. Pero diferían de los teatros griegos en varios aspectos significativos.

Por detrás del escenario existía una pared muy elevada, repleta de elementos de decoración muy elaborados, conocida con el nombre de “scenae frons”. La zona denominada “orquesta” tenía una forma semicircular al igual que las gradas de público, y estaba generalmente ocupada por los senadores, tribunos, ediles, etc. Ello exigía que la altura del escenario fuese inferior a la de los teatros griegos a fin de que la visión desde dicha zona fuera correcta y, además, impedía que la misma actuase como superficie generadora de primeras reflexiones hacia los espectadores debido a la absorción acústica propia de los senadores. Dicha altura era del orden de 1,5 m.

Con el objetivo de mantener unas condiciones de óptima inteligibilidad en todos los puntos, resultaba imprescindible reducir las dimensiones en relación con las de los teatros griegos y, al mismo tiempo, garantizar la existencia de una elevada pendiente de las gradas (alrededor de 30º y 34º).



Fig.1.4 Teatro de Aspendus (Turquía)

Algunas de estas diferencias respecto de los teatros griegos tenían una cierta repercusión en la acústica del recinto. Las construcciones teatrales romanas intentaban “envolver” al público con su forma. Este aspecto se conseguía aumentando las pendientes de las gradas y levantando el muro posterior a la escena, a la misma altura que remataba el peristilo de la parte final del graderío. Este cambio en la forma presentaba ciertos matices en lo referente a la acústica, uno de ellos sería la inconveniencia del muro alto en la escena, ya que probablemente generase reflexiones largas y tardías que no contribuyen a la mejora acústica del espacio.

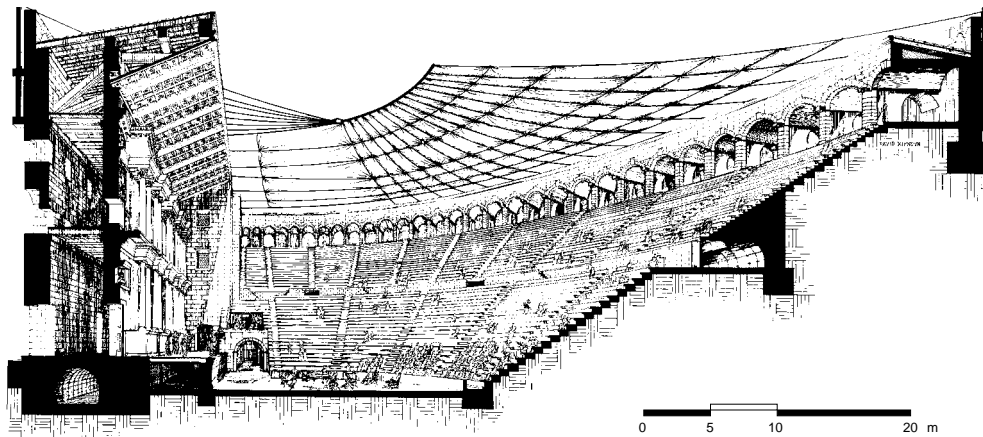


Fig.1.5 Teatro de Aspendus, Turquía (vista interior)

La capacidad de esta construcción era de 6.000 espectadores, mientras que la distancia entre el escenario y el asiento más lejano era de 53 m. Dichos valores son apreciablemente más bajos que los correspondientes al teatro griego de Epidauro. Por otra parte, mencionar que en éste y en otros teatros romanos, existía una lona que protegía a los espectadores de los rayos de sol. Si bien este material lo podríamos considerar parcialmente reflectante, se puede considerar que su presencia no daba lugar a la aparición de reverberación. Sin embargo, si la lona hubiese cubierto la totalidad del teatro, la reverberación habría sido tan elevada que habría impedido su uso principal como teatro debido a la pérdida de inteligibilidad de la palabra provocada por las reflexiones.

Es de destacar la afinidad en la manera de construir los teatros antiguos, esto es debido, en gran medida, a la existencia de unas normas de construcción claras y precisas. Nos referimos a "*Los diez libros de arquitectura de Marco Lucio Vitruvio*", en los cuales a parte de los métodos geométricos de determinación de la forma de los teatros, se hace referencia también a aspectos relacionados con la acústica.

Vitruvio clasificaba los teatros en cuatro grupos según sus propiedades acústicas: disonantes, circunsonantes, resonantes y consonantes, siendo este último el tipo ideal desde el punto de vista sonoro. Los recintos consonantes son aquellos en los que la voz, definida por el autor como una corriente que fluye en ondas circulares, alcanza los puntos más altos de las gradas sin encontrar obstáculos que impidan su propagación o produzcan reflexiones inconvenientes. Para conseguir esto, Vitruvio proponía que los pasillos horizontales de la circulación de las gradas, debían hacerse de forma proporcional a la altura del teatro, y siempre verificando que su altura fuese menor o igual que se anchura de paso. Otra recomendación de Vitruvio era la de colocar vasijas de bronce (o de barro cuando el presupuesto no fuera suficiente) en los teatros construidos en piedra o mármol. Estos elementos se disponían, en consonancia con la magnitud del teatro y con arreglo a las leyes de la ciencia armónica, en nichos abiertos entre los asientos de las gradas, de tal forma que dejaran un espacio suficiente alrededor y no tocasen las paredes de los mismos. El objetivo de esta medida era el que actuasen como resonadores sonoros.

Para concluir, podemos decir que el éxito de estos teatros abiertos dependía en gran medida de la existencia de un ambiente sonoro muy silencioso , además de la potencia y claridad de los actores. A su vez, las características acústicas de estos recintos presentan diferencias con los recintos cerrados, en los que se dan otros fenómenos sonoros. Hoy en día este tipo de representaciones al aire libre no son muy frecuentes, en la mayoría de los casos por los altos niveles de ruido ambiental (ruido de fondo) que existen, así como por las exigencias actuales.

A su vez, a la hora de la construcción de este tipo de auditorios al aire libre sí se han considerado algunas las técnicas utilizadas en la antigüedad. Por ejemplo paredes curvas en forma de concha o caparazón, compuestas de materiales reflectantes, con el principal objetivo de reflejar y dirigir el sonido hacia los espectadores. Sin embargo, el problema es que con estas técnicas la respuesta en frecuencia no es uniforme llegando con mayor facilidad a la audiencia los sonidos agudos frente a los graves. [2]

1.1 Acústica arquitectónica moderna

La acústica arquitectónica como ciencia moderna, empezó a desarrollarse a finales del siglo XIX gracias a los estudios de W. C. Sabine, quien en el periodo comprendido entre 1877 y 1905 realizó los primeros grandes avances, iniciando en 1895 sus trabajos en el Fogg Art Museum (hoy recibe el nombre de Hunt Hall) de la universidad de Harvard, y fue en esta época cuando encontró su famosa ecuación de reverberación. Posteriormente actuó como asesor en cuestiones de acústica en el diseño del Symphony Hall de Boston, considerada todavía hoy en día como una de las salas de mejor acústica del mundo.

Sabine realizó todos sus estudios sobre la reverberación con la única ayuda de sus oídos y con un cronómetro, ya que hasta esa época no comenzaron a desarrollarse nuevas técnicas basadas en los progresos de la electricidad y la electrónica. El pionero en utilizar los avances electrónicos propiciados por el desarrollo de la radiodifusión (micrófonos, amplificadores, altavoces, etc.) en el campo de la acústica (medida del tiempo de reverberación, etc.), fue Frederick Vinton Hunt en los años treinta. Diseñó un aparato para trazar con precisión las curvas de caída del sonido y emprendió el estudio del comportamiento del campo sonoro en recintos cerrados. En 1936 Philips M. Morse del Instituto de Tecnología de Massachussetts, publicó "Vibration of Sound", en el que explicaba su teoría de los modos normales de vibración en recintos rectangulares.

A partir del segundo cuarto del siglo XX, debido al desarrollo de elementos como el amplificador, el tubo de vacío, altavoces, micrófonos, etc., los investigadores comenzaron a obtener datos precisos que convertirían la acústica en una ciencia efectiva de la ingeniería, puesto que antes de disponer de los dichos aparatos electrónicos, no se contaba con los medios necesarios para producir sonidos específicos, medir la fuerza de los sonidos producidos, etc.

Todas estas novedades facilitaban el estudio y medida del campo sonoro en recintos cerrados, y supusieron un nuevo empuje en su desarrollo. Se efectuaron estudios sobre el significado en los auditorios de la difusión del sonido, relación de

energías sonoras directa y reverberante, camino libre como medio de propagación de las ondas, tiempo óptimo de reverberación para diferentes recintos, etc.

Al finalizar la II Guerra Mundial, se produjo un estallido cultural en Norte-América, que trajo consigo la construcción de grandes salas de concierto, teatros de ópera, auditorios de usos múltiples, estudios de radio y posteriormente de televisión, escuelas de música, etc. Para llevar acabo dichas obras era necesario un mejor conocimiento de los requisitos del campo sonoro en las grandes salas. Para ello se realizaron profundos estudios y medidas precisas en salas reconocidas por sus buenas cualidades acústicas, y los resultados se compararon con los puntos de vista de directores, músicos, críticos musicales, etc.

El deseo era construir grandes auditorios con gran capacidad, lo que chocaba con la primera observación que hicieron los críticos concluyendo que las salas pequeñas “sonaban” mejor que las grandes. Por otro lado, estos auditorios debían albergar tanto a una gran orquesta sinfónica o a una compañía de ópera, como a representaciones teatrales o conferenciales, lo que chocaba también con otra de las conclusiones obtenidas por los críticos, que opinaban que las salas construidas para utilizarse con varios fines eran peores a las construidas con un fin único.

A todo esto teníamos que sumarle que los arquitectos se enfrentaban también a otro problema que comenzaba a ser importante: el ruido. En esta época los avances de la ciencia y los progresos técnicos vinieron acompañados de graves problemas de ruido. Hoy en día las salas suelen situarse en sitios céntricos para facilitar el acceso del público, por lo que el ruido externo, principalmente debido al tráfico rodado, puede alcanzar niveles altos y es necesario incrementar el aislamiento del recinto.

Hasta el momento, la acústica arquitectónica se había desarrollado considerando principios y fórmulas basadas en experimentos y la consiguiente formación de las teorías apropiadas. A partir de esta época comenzó a realizarse el proceso inverso, es decir, comenzó a buscarse primero las teorías y buscar luego su corroboración experimental. Sin embargo, existen, muchos fenómenos para los que, debido a su naturaleza compleja, hay que recurrir a los métodos experimentales para su estudio. Por ejemplo, el tiempo óptimo de reverberación. (Hasta el día de hoy no ha sido posible desarrollar una teoría o sugerir unas reglas fijas y hay que recurrir a experimentos y estadística)

Cabe destacar que existían una serie de mitos que se transmitían de ciudad en ciudad y de época en época modificándose y aumentándose llegando hasta nuestros días. Por ejemplo, se decía que la pintura dorada de las paredes y estatuas en una importante sala de conciertos era la responsable de la excelente acústica de la sala. Otro mito nos decía que botellas de cristal rotas encontradas en los desvanes u otros sitios más recónditos de algunas salas también influenciaba en la acústica de la sala. Por último, en el sótano de la academia de música de Filadelfia, existe un pozo seco debajo del centro del teatro, y de grandes dimensiones. Mucha gente cree que está construido con propósitos acústicos, cuando en verdad se construyó como depósito de agua para prevención contra incendios.

Como se ha mencionado brevemente con anterioridad, no se puede conseguir una buena acústica en una sala demasiado grande. Una de las mayores salas del mundo es el “Royal Albert Hall” de Londres cuyo volumen es de $84.950m^3$. Si comparamos una sinfonía escuchada en esta sala y la misma sinfonía en otra sala de menores dimensiones, como por ejemplo el Conservatorio de Amsterdam con un volumen de $18.774m^3$, observaremos que la sala con un volumen mayor produce un efecto perjudicial por el que percibimos peor la misma sinfonía.

Una de las principales funciones de la acústica arquitectónica consiste en estudiar y predecir las proporciones perfectas de una sala. Si disponemos de una sala larga y estrecha (con forma de pasillo) en la cual la orquesta se sitúa en un lado de la sala y el público en el lado opuesto, al quitar el techo de la sala se producirían grandes cambios en la acústica de la misma. La longitud de una sala esta limitada por la distancia de visión por parte de los espectadores del escenario, mientras que su anchura debe determinarse mediante consideraciones acústicas. A esto debemos de sumarle las restricciones económicas, pero tampoco es necesario que tengan unas dimensiones precisas, ya que mediante unos reflectores colocados estratégicamente se puede proyectar el sonido en determinados lugares.

Muchas de las salas consideradas buenas acústicamente se construyeron durante el último siglo, lo que ha creado la idea de que no son buenas por su construcción original, si no, por su proceso de envejecimiento. Sin embargo, se sabe que a menos que la estructura de los asientos, cortinas, alfombras y otros materiales influyentes acústicamente se cambiasen o modificasen, la acústica de la sala no cambia de forma notable en toda su vida.

Para concluir con este apartado de revisión histórica, resumir que la realidad de las salas que no son buenas acústicamente es que terminan por desaparecer, ya que no realizan la función para la que fueron construidas, en cambio las buenas perduran y perdurarán con el tiempo. [3]

2. El sonido y su propagación

Este apartado está construido con el propósito de obtener unos conocimientos básicos sobre la definición de sonido y sus leyes fundamentales de propagación.

Definición del sonido:

El sonido se puede definir de varias formas, de todas ellas hemos elegido las siguientes:

1. Vibración mecánica que se propaga a través de un medio elástico y denso (habitualmente el aire), y que es capaz de producir una sensación auditiva. De dicha definición se desprende que, a diferencia de la luz, el sonido no se propaga a través del vacío y, además, se asocia con el concepto de estímulo físico.
2. Sensación auditiva producida por una vibración de carácter mecánico que se propaga a través de un medio elástico y denso.

El sonido humanamente audible consiste en ondas sonoras que se producen cuando los órganos de audición del oído humano captan las oscilaciones de la presión del aire, y se perciben por el cerebro. La propagación del sonido en los fluidos toma la forma de fluctuaciones de presión. En los cuerpos sólidos la propagación del sonido implica variaciones del estado tensional del medio. La propagación del sonido supone un transporte de energía sin transporte de materia, en forma de ondas mecánicas que se propagan a través de la materia sólida, líquida o gaseosa. Las vibraciones se producen en la misma dirección en las que se propaga el sonido, es decir, se trata de una onda longitudinal, que se transmite en línea recta, desde el punto de origen.

El elemento que genera el sonido se denomina fuente sonora (altavoz, tambor, cuerda de una guitarra, etc.). La generación del sonido tiene lugar cuando dicha fuente entra en vibración. Dicha vibración es transmitida a las partículas de aire adyacentes a la misma que, a su vez, la transmiten a nuevas partículas contiguas. Es importante destacar que las partículas no se desplazan con la perturbación, sino que simplemente, oscilan alrededor de su posición de equilibrio. La manera en que la perturbación se traslada de un lugar a otro se denomina propagación de la onda sonora. [2]

El sonido es, por tanto, una vibración en un medio elástico, donde las partículas de aire, sometidas a vibración, se mueven sólo una cantidad infinitesimal, (distancia muy pequeña) a cada lado de su posición de equilibrio, pero no así la energía sonora que progresa con la perturbación pudiendo alcanzar grandes distancias. La perturbación, o la onda, se propaga en sentido longitudinal, dado que la velocidad de las partículas tienen la misma dirección que la propagación de la onda. [4]

Si se considera como fuente sonora, por ejemplo, un tambor, un golpe sobre su membrana provoca una oscilación. Cuando la membrana se desplaza hacia fuera, las partículas de aire próximas a su superficie se acumulan creándose una zona de compresión, mientras que en el caso contrario, dichas partículas se separan, lo cual

induce una zona de enrarecimiento o dilatación (lo cual sucede al otro lado de la membrana).

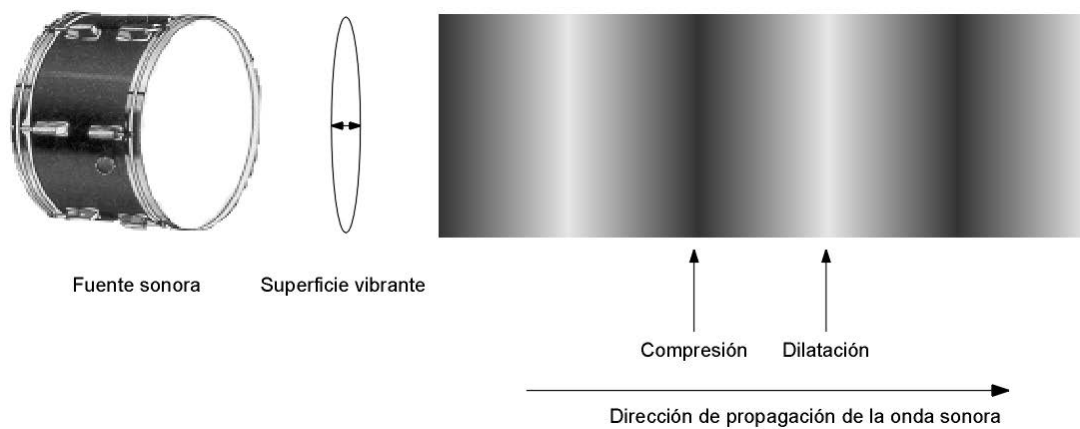


Fig.2.1 Zonas de compresión y dilatación de las partículas de aire en la propagación de una onda sonora

La oscilación de las partículas tiene lugar en la misma dirección que la propagación de la onda. En este caso hablamos de ondas sonoras longitudinales, en contraposición a las ondas electromagnéticas que son transversales (oscilación de la señal generadora perpendicular a la dirección de la propagación de onda).

2.1 Frecuencia

La frecuencia es un concepto importante al hablar de acústica, ya que juega un papel fundamental. La frecuencia consiste en la medida del número de repeticiones de un fenómeno por unidad de tiempo. Por ello el número de oscilaciones por segundo de la presión sonora " p " se denomina frecuencia (f) del sonido y se mide en hertzios (Hz). La frecuencia del sonido coincide con la frecuencia de la vibración mecánica que lo ha generado. A continuación podemos ver dos ejemplos de presiones sonoras de diferentes frecuencias.

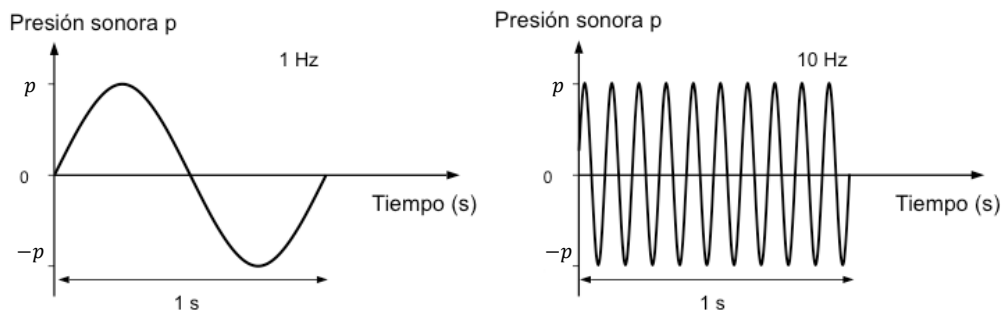


Fig.2.2 Oscilaciones de frecuencias de 1 Hz y 10 Hz

2.2 SPL Sound Presion Level

La manera de expresar un valor cuantitativo para referirnos a la magnitud de un campo sonoro es mediante la presión sonora, o la fuerza que ejercen las partículas de aire por unidad de superficie. La presión acústica se puede definir como rápidas variaciones de presión en torno a la presión atmosférica. Sin embargo, debido a que dicha presión atmosférica varía de forma muy lenta, a la hora de representar la presión acústica, ésta admite dos representaciones: como variaciones en torno a dicha presión atmosférica o en torno al valor nulo (sin olvidar que esta última representación sería una simplificación).

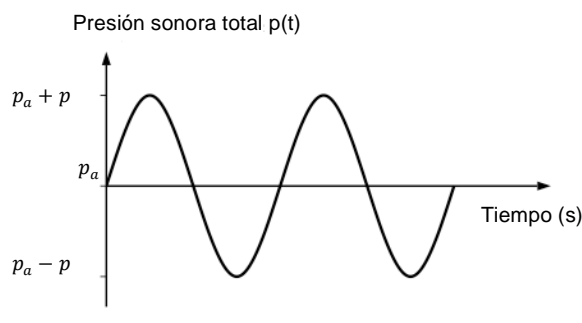


Fig.2.3 Evolución de la presión total P_t a lo largo del tiempo

Como hemos comentado anteriormente, la presión sonora es la manera habitual de expresar la magnitud de un campo sonoro. La unidad de medida es el Pascal (Pa). Debido a la variación del valor de presión sonora total (p_t) respecto de su valor de equilibrio en un periodo de tiempo, se utiliza como valor representativo su promedio temporal, que recibe el nombre de valor eficaz o r.m.s ("root-mean-square"). Sin embargo la utilización de dicho valor eficaz provoca una serie de problemas relacionados con el comportamiento del oído humano:

- El rango de presiones a las que responde el oído, desde el valor umbral de audición hasta el que causa dolor es bastante amplio. La presión eficaz mas baja detectada por una persona está en el orden de $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$, mientras que el umbral de dolor se sitúa en una presión eficaz de unos 100 Pa . Por ello es desaconsejable el uso de una escala lineal ya que trabajaríamos con un rango de números poco eficiente.
- Por otro lado nuestro sistema auditivo no responde linealmente a los estímulos recibidos, si no que lo hace de forma logarítmica.

Por estos dos motivos mencionados fundamentalmente, es conveniente hacer uso de una escala logarítmica para representar la presión sonora. Esta escala expresa valores relativos en función a un valor de referencia, la presión eficaz correspondiente al umbral de audición a 1 kHz. Ahora bien, hablamos de nivel de presión sonora SPL o L_p expresado en decibelios (dB):

$$SPL = 10 \log \frac{P_{ef}^2}{P_{ref}^2} \text{ (dB)}$$

La utilización del umbral de audición como referencia tiene como objetivo que todos los sonidos audibles sean representados por valores SPL positivos. El uso de dB reduce el rango de presiones sonoras a niveles de 0 a 135 dB, donde 0 es el mínimo valor audible y 135 el umbral aproximado de dolor. De esta manera trabajamos con cifras más cómodas y que tendrán una relación entre cambios de nivel sonoro y su efecto subjetivo como sigue a continuación:

- 1 dB mínimo cambio de nivel sonoro perceptible.
- 5 dB cambio de nivel claramente percibido.
- 10 dB incremento asociado a una sonoridad doble.

Si utilizamos una tabla para catalogar algunos elementos cotidianos en función de su nivel sonoro en decibelios podríamos catalogarlos como sigue a continuación:

Fuente Sonora	Nivel de presión SPL (dB)	Valoración subjetiva del nivel
Avión despegando (a 60 metros de distancia)	120	Muy elevado
Edificio en construcción	110	
Martillo neumático	100	
Camión pesado (a 15 metros de distancia)	90	Elevado
Calle (ciudad)	80	
Interior automóvil	70	
Conversación normal (a 1 metro de distancia)	60	Moderado
Oficina, aula	50	
Habitación vivienda vacía	40	
Dormitorio (noche)	30	Bajo
Estudio de radiodifusión	20	

Tabla 2.1 Tabla de niveles de ruido

2.3 Propagación

En cuanto a la propagación, si situamos una fuente sonora situada en un recinto cerrado y la activamos, genera una onda que se propaga en todas las direcciones. Un oyente situado en cualquier punto del recinto recibirá dos tipos de sonido, por un lado el sonido directo, es decir, aquél que le llega directamente desde la fuente sin ningún tipo de interferencia. Y por otro lado el sonido indirecto o reflejado originado como consecuencia de las diferentes reflexiones que sufre la onda sonora al chocar con las superficies del recinto. En un apartado posterior abordaremos el sonido reflejado con mas detalle.

Centrándonos en el sonido directo, consideramos una fuente omnidireccional, una fuente que radia energía uniformemente en todas las direcciones. El hecho de que

la radiación sea uniforme implica que, a una distancia cualquiera de la fuente, el nivel de presión sonora SPL sea siempre el mismo, con independencia de la dirección de propagación considerada. Esto certifica el modo de propagación denominado propagación esférica. A medida que nos alejamos de la fuente, la energía sonora se reparte sobre una esfera cada vez mayor, por lo que el nivel SPL en cada punto disminuye progresivamente. En concreto, la disminución es de 6dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Este principio se denomina ley de la divergencia esférica y significa que el valor de la presión sonora se reduce la mitad.[2]

El patrón de propagación anteriormente escrito es válido siempre y cuando la fuente sea simple (generando ondas esféricas con un patrón de directividad omnidireccional) y que estas ondas se propagan al aire libre sin fronteras físicas. Si estas existiesen, la propagación se vería modificada y no se podría considerar el modelo de ondas esféricas concéntricas.

Al referirnos a la fuente que genera el sonido, es necesario distinguir el espacio sonoro en dos zonas: “campo próximo” y “campo lejano” de la fuente. Cuando hablamos de “campo próximo”, la propagación no sigue la ley de la inversa del cuadrado de la distancia, puesto que el frente de onda no es esférico. Por otro lado, si hablamos de campo lejano, sí que podremos asegurar que nos encontramos a una distancia suficiente de la fuente en la cual se cumple la ley de la inversa del cuadrado de la distancia, es decir las ondas son esféricas.

Luego, las condiciones de campo libre aplicadas en este caso en el campo lejano de una fuente puntual definen satisfactoriamente el campo en esa región, puesto que el comportamiento es independiente de la forma y tamaño de la fuente. En el campo próximo el patrón de propagación depende del tamaño y forma de la fuente.[5]

2.4 Reflexión, transmisión y difracción de las ondas sonoras

Cuando tenemos una onda plana progresiva propagándose a través de un medio y se encuentra una superficie límite o de separación con otro medio se origina una onda reflejada en el primer medio y otra transmitida en el segundo. Estableciendo como ejemplo didáctico la situación de la figura 2.4, el espectador recibirá en primer lugar el sonido directo que es el que viaja directamente de la fuente a su posición sin la interposición de ningún obstáculo. En segundo lugar recibirá el sonido reflejado por la pared que se encuentra situada justo detrás de su posición, el sonido cumple el recorrido fuente-pared-espectador.

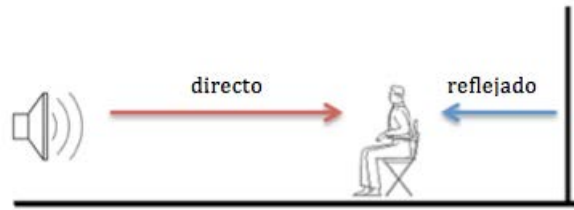


Fig.2.4 Reflexión de ondas

Si vemos el diagrama de energía-tiempo, queda reflejado cómo llega primero el sonido directo que es el que viaja por el camino más corto y a continuación el sonido reflejado en la pared que se encuentra situada detrás del espectador.

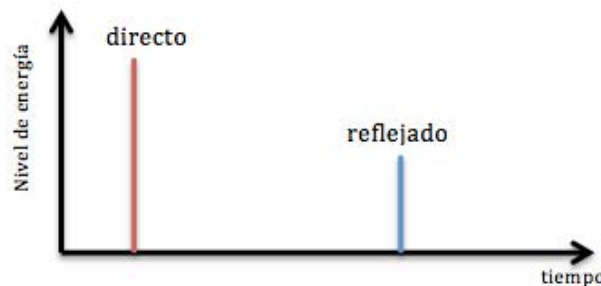


Fig.2.5 Reflexión de ondas

Esto mismo que sucede con la pared trasera sucede con otras superficies, generándose además reflexiones de múltiples órdenes (donde la onda choca contra más de una superficie), dando lugar, siempre y cuando su llegada al receptor sea cercana al sonido directo, al conocido efecto denominado reverberación.

En cuanto a la refracción del sonido, la dirección de propagación de las ondas transmitidas no es la misma que la dirección de las ondas incidentes, ya que se desvían acercándose o alejándose a la normal del plano límite, de acuerdo con las velocidades de propagación en los medios. La refracción de las ondas sonoras se puede presentar en un medio simple, tal como la atmósfera, o en un medio como el mar, debido a las variaciones que se presentan por el efecto del viento o cambios de temperatura.

Sin embargo, la ley de propagación rectilínea de las ondas sonoras no es rigurosamente válida, puesto que de alguna forma, éstas se curvan en las cercanías de obstáculos. Estas excepciones a la ley de propagación rectilínea se conocen como fenómenos de difracción. Este fenómeno se puede observar con claridad en las ondas sonoras aunque debemos tener en cuenta la relación entre las dimensiones del obstáculo y la longitud de onda de las ondas sonoras, ya que si ésta es mucho mayor que las dimensiones del obstáculo es muy difícil de apreciar.[5]

Como comentamos en el párrafo anterior hablamos de difracción cuando el sonido en lugar de seguir en la dirección normal, se curva en las cercanías de obstáculos. La explicación a este fenómeno la podemos encontrar en el principio de Huygens

que establece que cualquier punto de un frente de ondas es susceptible de convertirse en un nuevo foco emisor de ondas idénticas a la que lo generó. De acuerdo con este principio, cuando la onda incide sobre una abertura o un obstáculo que se interpone en su camino de propagación, todos los puntos de su plano se convierten en fuentes secundarias de ondas, emitiendo nuevas ondas, ondas difractadas. La difracción se puede producir por dos motivos diferentes:

El primero de ellos es porque la onda sonora se encuentre a su paso un pequeño obstáculo y lo rodee. En este caso las bajas frecuencias son más capaces de rodear los obstáculos que las altas. Esto se hace posible debido a que las longitudes de onda en el espectro audible están entre 1,7 cm y 17 m por lo que son suficientemente grandes para superar la mayor parte de los obstáculos encontrados.

Por otro lado, puede darse la situación en la cual la onda se topa con un pequeño agujero y lo atraviesa. La cantidad de difracción estará dada en función del tamaño de la propia abertura y de la longitud de onda. Si la abertura es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño.

Sin embargo, si el tamaño de la abertura es menor en comparación con la longitud de onda, los efectos de la difracción son grandes y la abertura se comporta como si fuese una fuente puntual que radiase sonido.

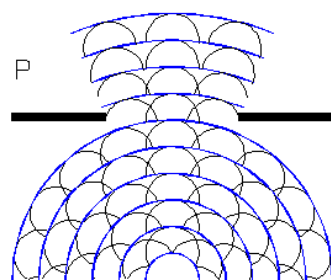


Fig.2.6 Difracción apertura grande.

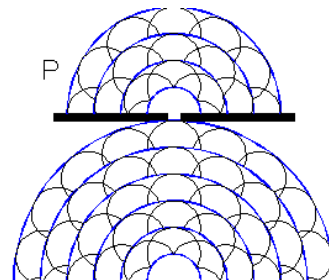


Fig.2.7 Difracción apertura pequeña.

2.5 El campo sonoro en recintos

Si nos encontramos en un descampado y escuchamos un sonido, podemos identificar rápidamente su procedencia. La fuente vibra y transmite estas vibraciones a las partículas de aire situadas en la atmósfera que a su vez en forma de variaciones de presión se propagan en todas las direcciones creándose un campo, pudiéndose estudiar este campo mediante las leyes que rigen la presión sonora con el tiempo y la distancia.

Si la fuente produce el sonido continuamente, éste se hace más intenso a medida que nos acercamos a la misma, mientras que se debilita si nos alejamos de ella. Al no existir casi ondas reflejadas, las vibraciones de las partículas de aire de la fuente sonora que nos llegan disminuyen según la ley de la divergencia esférica. Además

debemos tener en cuenta que si existe viento, el sonido será más intenso en la dirección favorecida por éste, y más débil en la dirección contraria.

Cuando nos situamos en un campo libre, en el exterior, una de las principales dificultades que nos encontramos cuando intentamos escuchar un sonido es que debemos tener en cuenta que al sonido de la fuente en la que estamos interesados debemos añadirle los ruidos procedentes de otras fuentes, por ejemplo del tráfico en ese momento, los peatones que circulen por la zona, niños jugando, un avión, etc. Además en el exterior estaremos expuestos a condiciones climatológicas y sus variaciones.

Ahora bien, como ya hicieron en la antigüedad, si se coloca una cubierta acústica a los lados y por encima de la fuente, mejoran considerablemente las condiciones de audición. De esta manera, creamos una barrera que protege la fuente de sonidos extraños que llegan del exterior y en segundo lugar la cubierta recoge el sonido que hubiera sido radiado hacia arriba y hacia la parte trasera de la fuente y lo dirige hacia el auditorio.

La protección acústica también proporciona mejoras para la fuente que se encuentra en su interior, ya que se puede escuchar a sí misma mejor, puesto que los sonidos se amplifican y se reflejan volviendo a la fuente. Todo esto se cumple cuando no existe público, ya que el público absorbe el sonido cuando una onda se radia hacia el exterior por la fuente o fuentes sonoras, a través de las cabezas de un público sentado en un suelo horizontal, la intensidad sonora disminuye más rápidamente al aumentar la distancia que como disminuiría en caso de no existir público.

Esto demuestra lo poco eficiente que resulta colocar al público en un suelo horizontal. Dicho principio ya era conocido en la antigüedad, y según comentamos en el primer apartado de este trabajo, los teatros griegos y romanos se construían bajo este principio, colocando a la audiencia en contacto visual y auditivo directo con la fuente, mediante los asientos a diferentes niveles.

Para luchar con la influencia de ruidos externos y agente atmosféricos, lo ideal sería levantar unas paredes laterales y un techo por encima de la superficie que ocupan los espectadores, a la vez, se deben cubrir estas superficies con materiales que absorban y sean muy eficaces para las ondas sonoras. En este caso, las condiciones acústicas no habrán cambiado, ya que el sonido se radia en todas las direcciones, y es absorbido completamente como sucedía en espacios abiertos, pero se ha eliminado el ruido de los aviones y el efecto de los agentes atmosféricos. De esta forma se mejora el sonido de la fuente que se escucha tal y como lo produce. Un recinto de estas condiciones se denomina recinto anecoico, o acústicamente muerto, ya que no altera la onda producida por la fuente.

Las superficies limítrofes del recinto, cambian el carácter del campo sonoro. El volumen de aire encerrado entre esas superficies, no sólo está excitado mientras la fuente está emitiendo, sino que puede continuar en este estado de vibración después de que la misma ha dejado de emitir. La respuesta en frecuencia de un recinto, como la de cualquier otro sistema vibratorio, depende de las dimensiones

del recinto. Las características de la respuesta en frecuencia del recinto, pueden ser muy diferentes a las del espectro de frecuencia de la señal básica de la fuente sonora. En este caso, las frecuencias componentes de la señal que coinciden con las frecuencias características del recinto, como consecuencia de la resonancia, resaltan de aquellas otras que no tienen equivalente en el espectro normal de frecuencia del recinto. También puede existir un mayor o menor énfasis en las frecuencias componentes de la señal básica, como consecuencia de las diferentes velocidades de amortiguamiento de los modos normales de vibración. Todo esto produce un cambio en la estructura de la señal básica. [3]

3. Teorías Acústicas

El recinto juega un papel fundamental en el proceso de radiación y recepción del sonido, teniendo además una influencia significativa sobre la calidad del mismo. Los cambios que un campo acústico experimenta, si la fuente sonora está situada en un espacio ilimitado, si se encuentra en el interior de un recinto, o bien en un recinto semi-abierto pueden ser útiles y perjudiciales a la vez, desde el punto de vista de percepción auditiva.

La reverberación (persistencia) que acompaña a cada impulso de una señal irregular (palabra o música) puede ser útil siempre que la duración sea la debida, escuchándose la palabra más clara y la música más animada, debido al encadenamiento entre los sucesivos tonos musicales. Si la reverberación es muy grande, la palabra es menos inteligible, y en la música se produce un solapamiento entre las notas musicales, por lo que la audición se empeora, al tener menos calidad.

Además, la calidad de un campo sonoro que está encerrado total o parcialmente, está íntimamente relacionada con las dimensiones lineales del recinto, generando el efecto conocido como coloración, el cual se traduce en que, para ciertas frecuencias, el SPL depende altamente de la posición de escucha, o, dicho de otro modo, para diferentes posiciones de escucha, el recinto amplifica o atenúa las frecuencias de distinta forma, teniendo una respuesta en frecuencia diferente. Este efecto de coloración es más importante conforme menor es el recinto con respecto a la longitud de onda.

El énfasis que se produce en algunas frecuencias respecto a otras, produce un cambio en el timbre de la señal básica de la fuente, originando un efecto adverso sobre la recepción de la palabra y la música.

Por todo lo expuesto anteriormente, se observa que es necesario un cuidadoso estudio del campo sonoro creado en un recinto por las fuentes, con el fin de determinar en qué condiciones ciertos cambios producidos por un recinto en la señal básica, son útiles o perjudiciales, así como determinar qué factores tienen influencia sobre la calidad de la palabra y de la música.

Durante los años, han surgido una serie de modelos teóricos que tratan de describir cómo se propaga el sonido en el interior de recintos. Dichas teorías, de complejidad creciente, son principalmente tres: teoría estadística, teoría geométrica y teoría ondulatoria. Además, la literatura suele considerar otra teoría, denominada psicoacústica, que se caracteriza por incluir factores relativos a la percepción humana.

A continuación, se pasa a describir brevemente cada una de estas teorías, puesto que algunas de ellas (principalmente la teoría estadística y la geométrica) son la base del cálculo de la mayoría de softwares comerciales de simulación acústica de recintos, como el utilizado en este trabajo.

3.1 Teoría Estadística

Cuando se conecta una fuente sonora en un recinto, como consecuencia de las reflexiones, existe un crecimiento gradual de la energía, cesando posteriormente el aumento después de cierto tiempo, alcanzando la energía en el recinto un valor constante.

Si una vez alcanzado este valor, la fuente deja de emitir, el sonido que recibe el observador no desaparece inmediatamente. Un corto tiempo después de que la fuente ha dejado de emitir, desaparece la onda directa y el observador recibe la energía de la primera onda reflejada, después la segunda, después la tercera, etc., ondas reflejadas y así sucesivamente, siendo la energía de estas ondas cada vez más pequeña. Después de un cierto intervalo de tiempo, la energía de estas ondas que llegan al observador, ha disminuido tanto, que el oído no puede percibir las y el sonido desaparece.

Si se elige para representar gráficamente esta variación una escala logarítmica, se observa que el proceso de crecimiento es relativamente rápido, mientras que el de descenso es más lento, representando además este gráfico la forma real de escucha del sonido, puesto que el oído no reacciona a la intensidad de la perturbación, sino a un valor próximo al logaritmo de esta intensidad. El proceso de persistencia y disminución de la energía en un recinto, una vez desconectada la fuente sonora, recibe el nombre de reverberación, y el tiempo que tarda la señal sonora en reducirse un valor de 60 dB se conoce como tiempo de reverberación.

Esta teoría supone que las ondas reflejadas dentro de un recinto viajan en todas las posibles direcciones con igual probabilidad, al igual que la energía radiada por la fuente. Las fases de las ondas que llegan a cada punto del recinto, pueden considerarse que están distribuidas de una forma aleatoria, teniendo en cuenta que las señales producidas en el recinto (palabra y música) son señales aleatorias e irregulares. Esto nos permite determinar la energía en cualquier punto del recinto, sin tener en cuenta los retrasos de fase entre las ondas, así como la suma de los valores medios de la energía de las reflexiones que alcanzan el punto del recinto en estudio.

Las combinaciones de fenómenos aleatorios con propiedades comunes que alcanzan cada punto del recinto se estudian mediante la matemática estadística basada en la teoría de la probabilidad. El método estadístico no descubre los detalles físicos intrínsecos del fenómeno, sin embargo su ventaja consiste en el hecho de que mediante unas matemáticas sencillas podemos obtener unas conclusiones objetivas de los aspectos cuantitativos del proceso, así como de sus posibles efectos.

Al aplicar matemáticas estadísticas a sucesos aleatorios, si por cualquier causa el fenómeno deja de ser aleatorio, nos da una baja descripción del proceso, por ejemplo, en nuestro caso, una de las superficies del recinto dispone de un coeficiente de absorción igual a uno (absorción total) ya que no existe dicha pared (el techo de nuestro recinto). Por ese motivo, la naturaleza aleatoria de la dirección de llegada de las ondas reflejadas es menor, por lo que podemos concluir que en

nuestro caso el análisis estadístico no es tan directamente aplicable al no cumplir las premisas necesarias. Sería interesante de cara a un trabajo futuro el desarrollo de un software dedicado a este tipo de recintos al aire libre que utilizara suposiciones de la teoría estadística.

3.2 Teoría Geométrica

La teoría geométrica no supone una distribución de energía uniforme, sino que considera el campo sonoro como una combinación de rayos, contruidos a partir de las leyes de la óptica geométrica; de esta forma la onda sonora se ha sustituido por un rayo, a lo largo del cual se propaga la energía sonora. Mediante esta teoría se puede analizar la distribución de las superficies límite para encontrar la causa de la falta de uniformidad y neutralizar su efecto. Nos permite detectar una reflexión fuerte (eco) que llega con suficiente intensidad y retardo, y neutralizar su efecto. Nos permite detectar concentraciones de energía producidas por superficies cóncavas del recinto. Si nos encontramos en una situación donde tenemos zonas deficitarias de energía, la teoría geométrica nos permite determinar la disposición y el tamaño de las superficies reflectantes para que envíen sonido útil a dichas zonas.

En este caso, el campo sonoro en el recinto se estudia mediante la energía sonora, determinada en cualquier punto, calculando las pérdidas de todos los rayos que después de reflejarse pasan por dicho punto. Consideraremos un rayo sonoro como una pequeña parte de la onda esférica, con una abertura despreciable, que se origina en un cierto punto, que tiene una dirección de propagación muy definida, y que está sujeto a las mismas leyes de propagación del rayo luminoso.

La aplicación de las leyes de geometría para la acústica de salas se resume en dos leyes:

- La Propagación en línea recta.
- La reflexión especular (Ley de Snell).

Sin embargo, se debe asumir una serie de restricciones para que el modelo sea totalmente válido: las superficies límites han de ser planas y las longitudes de onda deben ser menores que las dimensiones de la sala y los obstáculos. Estas condiciones, afectan de un modo muy importante a los métodos informáticos de simulación acústica que operan con rayos sonoros.

3.3 Teoría Ondulatoria

La teoría ondulatoria se basa en el hecho de que el espacio vacío dentro de un recinto dispone del mismo comportamiento que un sistema vibratorio, que es excitado por la señal producida por la fuente sonora. Este modelo es similar al utilizado para describir los modos normales de vibración de una cuerda, una membrana, salvo que de manera tridimensional en el caso de un recinto. [3]

La combinación de ondas incidentes y reflejadas en una sala da lugar a interferencias constructivas y destructivas, es decir, la aparición de ondas estacionarias o modos propios de la sala. Cada modo propio va asociado a una frecuencia, también denominada frecuencia propia, y está caracterizado por un nivel de presión sonora SPL que varía en función del punto considerado. El número de modos propios es ilimitado, pero su distribución a lo largo del eje de frecuencias es discreta, aumentando su densidad con la frecuencia. La presencia de todos ellos provoca en cada punto una concentración de energía alrededor de las diversas frecuencias propias, lo cual provoca un sonido característico a cada sala y en cada punto.

Los valores de las frecuencias propias asociadas a los diferentes modos propios dependen de la geometría y de las dimensiones del recinto, su determinación suele ser compleja. Existe una excepción, en caso de que tengamos recintos de forma paralelepípeda con superficies totalmente reflectantes es posible calcularlos de una forma muy sencilla, mediante la denominada fórmula de Rayleigh:

$$f_{k,m,n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{k}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2}$$

donde L_x , L_y , L_z representan las dimensiones de la sala en metros, mientras que las constantes k , m , n , pueden tomar cualquier valor entero (0, 1, 2, ...) siendo cada combinación de valores k , m , n , una frecuencia y modo propio asociado, que recibe el nombre de modo propio k , m , n .

Si partimos de que la existencia de modos propios es inevitable, conviene elegir una relación entre las dimensiones de la sala tal que la distribución de los mismos en el eje frecuencial sea lo más uniforme posible. De esta manera conseguiremos evitar concentraciones de energía en bandas estrechas de frecuencias, también denominado como coloraciones intensas de sonido.

Por otra parte, como se ha comentado antes, la densidad de modos propios aumenta con la frecuencia. Esto significa que, a partir de una cierta frecuencia, el concepto de coloración del sonido deja de tener sentido, ya que una gran unidad de modos propios es equivalente a la ausencia de éstos, ya que dejamos de tener concentraciones discretas de energía. Esa frecuencia, denominada frecuencia de corte, es menor conforme mayores son las dimensiones del recinto. [6]

Un detenido estudio del proceso ondulatorio en un recinto concreto, nos permite revelar la naturaleza de este proceso y entender la manera en que las ondas influyen en las propiedades acústicas del recinto. Sin embargo, este estudio requiere de unos recursos computacionales muy altos, lo que hace que los softwares comerciales de simulación acústica no incluyan consideraciones de esta teoría. [3]

3.4 Teoría Psicoacústica

Existe la necesidad de que la acústica de un local sea satisfactoria tanto para la persona que genera la señal como para la persona que la recibe. La calidad sonora de un local se podría medir en cuanto al nivel de inteligibilidad de la palabra si tratamos de evaluar una sala de lectura o un teatro, pero si se trata de evaluar actuaciones musicales existen diferencias. No todo el mundo se siente satisfecho con la acústica de un recinto, a pesar de que los parámetros de evaluación objetivos sean satisfactorios, es el oído el que tiene la última palabra. [3]

La psicoacústica es la parte de la acústica encargada de examinar y modelar las características de la audición humana que permiten localizar e identificar la fuente de un sonido percibido. El aparato auditivo del ser humano es diferente en cada individuo, por ello, un mismo sonido puede producir distintas sensaciones sonoras. Es importante diferenciar entre sonido y audición, ya que el sonido es lo que se produce físicamente, mientras que la audición es lo que nuestro cerebro interpreta de esa onda física.

Las medidas se basan en experiencias empíricas bajo unas condiciones específicas, pero su conclusión es puramente subjetiva. Por lo cual, no podremos tener unas conclusiones fiables de cara a la caracterización de un recinto, si no que tendremos unas conclusiones subjetivas que dependerán de los individuos sometidos al experimento y del tipo de música emitida en el recinto.

Si bien la psicoacústica es una teoría meramente subjetiva y dependiente del individuo, a lo largo de los años, y gracias a experimentos sobre grandes grupos de personas, se han podido describir ciertos fenómenos relativos a la inteligibilidad de la palabra o la percepción de la molestia de eco. De esta forma, la mayoría de softwares de simulación permiten calcular parámetros relacionados con la inteligibilidad de la palabra, o incluso, proporcionar información sobre si una reflexión en alguna superficie va a generar un eco audible.

Cabe mencionar que en este trabajo se ha realizado una descripción reducida de las teorías acústicas. Esto es debido a que, otros proyectos fin de carrera dedicados también a simulación acústica incluyen una descripción detallada de las mismas. El lector interesado puede dirigirse a: [7].

4. Presentación de la Casa de la Cultura de Sonseca

Sonseca es un municipio de unos 11.600 habitantes que se encuentra situado en la provincia de Toledo en Castilla la Mancha, concretamente a 24 km de Toledo y a 94 km de Madrid. Linda con los municipios de Ajofrín, Orgaz y Mazarambroz y es la séptima ciudad de la provincia en cuanto a población censada.

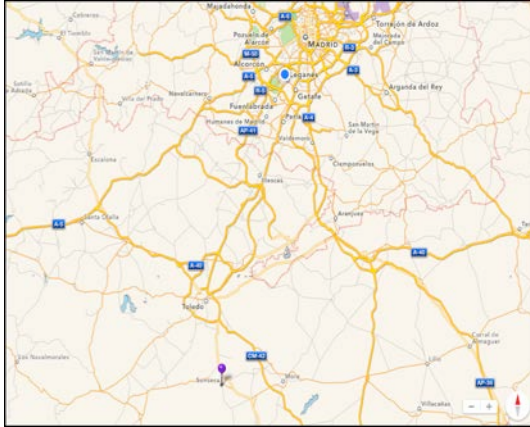


Fig.4.1 Situación del municipio de Sonseca



Fig.4.2 Monumento representativo del municipio de Sonseca.

Debido a su amplio entramado industrial, consta de un ingente número de población flotante de las localidades y comarcas limítrofes, ampliándose ésta en temporadas de producción de mazapanes y turrone, producto típico de la localidad albergando varias de las empresas mas importantes en el sector como La Confitería de la Viuda. A su vez, el sector de la madera y textil han tenido mucho auge en la localidad siendo los principales fuentes de empleo y desarrollo económico de la población.

Entre sus edificios históricos y no precisamente por su antigüedad si no por cómo se consiguió su construcción, destaca el edificio con nombre Casa de la Cultura. Edificio dedicado a la cultura dentro del pueblo de Sonseca donde se encuentran situados la biblioteca municipal, un centro informático, aulas de fotografía, salas de pintura, salas de ensayo de bailes, danzas y teatro y salas de conferencias. Todo esto albergado en los muros laterales y frontal, encerrando en su interior un amplio auditorio formado por un escenario abovedado por un entramado de vigas de madera y un patio de butacas descubierto. A su vez, este patio se compone en sus laterales de unos corredores techados separados por columnas del patio propiamente dicho.

En cuanto a los orígenes de la Casa de la Cultura de Sonseca, su origen está claramente ligado al Teleclub Revuelo, una de las asociaciones o agrupaciones civiles tenidas en Sonseca. A través de su persistencia y actividad con el fin de la consecución de una casa de la cultura, lograron activar el proceso.

Al hablar de los orígenes de la Casa de la Cultura propiamente dicha, debemos pararnos en 1979 donde, tras unas largas y complicadas negociaciones, el Ministerio de Cultura cedió el terreno solicitado al ayuntamiento de Sonseca con el propósito de la construcción del edificio. Sin embargo, no es hasta 1983 cuando comienza a construirse la primera de las cuatro fases que comprende el proyecto general de la ansiada Casa de la Cultura. Bajo el diseño del arquitecto sonsecano Carlos Ruiz Gil de la Serna, teniendo como director de obras al aparejador Eugenio Perezagua Gil se comienza la obra presupuestada en ocho millones de pesetas.

Es el 5 de Mayo de 1984 cuando con la celebración de la X Semana Cultural queda inaugurada la primera fase, instalándose en ella la biblioteca municipal y dos salones de exposiciones, conferencias, etc. Con las posteriores subvenciones se logra que la segunda fase con presupuesto de 14 millones de pesetas se pusiera en marcha al año siguiente. Con posterioridad la tercera y finalmente la cuarta y última de las fases donde se construye el actual auditorio, siendo el 27 de Agosto del año 1999 cuando se inaugura la última de las fases. [8]

Gracias a la ampliación y finalización de la cuarta fase, funcionan desde entonces los siguientes servicios y despachos públicos: despacho de la Agente Cultural; cuatro salas de usos múltiples; despacho para las Asociaciones de Padres de primer y segundo grado; la Escuela de adultos; aula de fotografía, dos salas para exposiciones; centro de informática; ludoteca; aula de artes plásticas; sala de conferencias; aula de danza; emisora de radio y biblioteca.

Y situado en el centro de todos estos servicios y despachos albergados en el perímetro del edificio se encuentra el amplio patio interior del edificio, un auditorio descubierta con capacidad para unas 800 personas sentadas, con un escenario en el fondo sur techado con una bóveda triangulada con vigas de madera donde se llevan acabo, conferencias, pregones, representaciones teatrales, audiciones musicales y conciertos.

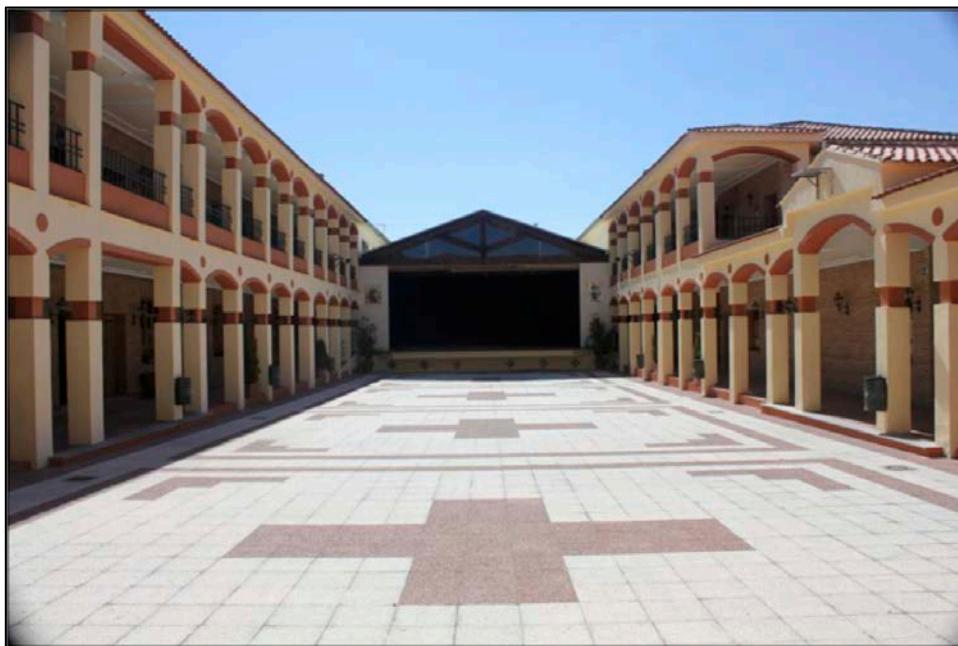


Fig.4.3 Patio-Auditorio. Vista desde fondo norte

A esta Casa de la Cultura se puede acceder por la puerta principal, situada en la calle Arroyada o bien por una puerta lateral, en la calle Santa Ana (fachada oeste) que da acceso directo al auditorio y dependencias de esa zona. [9]



Fig.4.4 Patio-Auditorio. Vista aérea



Fig.4.5 Patio-Auditorio. Vista interior de las puertas de acceso.

Para conseguir una idea más detallada del auditorio a estudio se muestra a continuación una galería de imágenes donde se aprecian las distintas partes que influyen en nuestro estudio.

1.- Panorámica del auditorio:



Fig.4.6 Patio-Auditorio. Vista desde la fachada norte (izqda) y vista desde el escenario (dcha)

2.- Corredores donde se distribuyen las diferentes aulas albergadas en el recinto:



Fig.4.7 Corredores contiguos al patio, primer y segundo piso

3.- Escenario:



Fig.4.8 Detalles del escenario

Posteriormente en la parte de simulación del recinto se especifica más detalladamente los materiales que se utilizan para la simulación de cada una de las partes así como su método de construcción.

Desde el punto de vista de diseño acústico, el teatro auditorio se caracteriza por estar delimitado por cuatro paredes laterales pero se encuentra descubierto (sin techo). Por ello, debemos tener en cuenta la transmisión por ruido aéreo que pueda provocarnos el tráfico circulante por las calles contiguas, ruido provocado por la gente que transite por el exterior, en ocasiones algún evento que tenga lugar en los alrededores y requiera de refuerzo sonoro, etc. Además, las condiciones climáticas también podrían ser muy influyentes para nosotros, al estar descubierto

pueden generarse corrientes de viento en el interior del patio de butacas modificando así la propagación normal de la onda sonora, ruidos provocados por truenos, lluvia, etc.

En cuanto a la afección de la audiencia en la creación del campo, en nuestro recinto la colocación de la misma podemos considerarla plana ya que existe una inclinación pero no relevante y las personas colocadas en la parte de atrás del auditorio tienen dificultades de visibilidad y es necesario el refuerzo sonoro para una buena escucha.

Por otro lado, las paredes de nuestro recinto no están cubiertas por ningún material absorbente lo que producirá reflexiones de la onda incidente. Estos aspectos característicos de nuestro recinto los estudiaremos con mas detalle en la parte de simulación acústica del mismo.

5. Construcción del recinto con EASE

El diseño de recintos de grandes dimensiones supone un reto para cualquier especialista en Acústica Arquitectónica, que apoyándose en las teorías expuestas en los capítulos anteriores trata de diseñar un campo sonoro que cumpla con los requisitos establecidos en función de las características del recinto y de las particularidades de la actividad desarrollada en el mismo.

El método que se ha empleado durante más tiempo para el diseño acústico de grandes recintos ha sido la construcción de una maqueta de dimensiones proporcionales al original, y realizar el estudio de la propagación sonora en él. Esta metodología tiene la ventaja de que nos permite, mediante un bajo coste, poder probar un gran número de variaciones, desde la elección de diferentes materiales para el recubrimiento de las paredes hasta las posibles modificaciones en la forma del recinto.

Una sistemática similar se utiliza en los programas de simulación acústica, donde, sin necesidad de construir físicamente la maqueta, se genera un modelo virtual en el cual se puede evaluar el campo sonoro en el interior de un recinto. Gracias a estos programas se pueden obtener valores de difusión sonora, ecogramas, tiempos de reverberación, etc., que nos permiten evaluar objetivamente la calidad sonora del recinto. Este procedimiento facilita de gran manera el cálculo, aunque sus limitaciones están ligadas a las hipótesis y simplificaciones en las que se fundamenta el modelo de simulación empleado, que incluye tanto simplificaciones en la construcción del modelo como suposiciones en los cálculos por parte del programa de simulación, en el cual basa sus predicciones principalmente en la teoría estadística y en la geométrica.

Para el desarrollo de esta simulación hemos utilizado el software de simulación acústica EASE (Enhanced Acoustic Simulator for Engineers).



Fig. 5.1 Software de simulación acústica EASE

EASE está formado por una serie de programas individuales pero vinculados entre sí, que proporciona a los diseñadores de sistemas y consultores un valioso conjunto de herramientas para todos los aspectos de la práctica profesional, de modelado realista detallado del recinto, de la simulación de la acústica de un lugar y del rendimiento del sistema de sonido. EASE ayuda a los diseñadores mostrando gráficamente las predicciones exactas de la acústica en el mundo real. Los modelos creados por EASE son una forma ideal para explorar las opciones y evaluar su

funcionalidad antes de llevarlas a acabo en la realidad y que sus cambios sean mucho mas costosos. [10]

Las principales ventajas de la simulación mediante el software son:

- Mostrar visualmente los cálculos realizados por el software de simulación electroacústica.
- Asegurarse de cumplir con los requisitos de Sound Presion Level, tiempo de reverberación, y otras exigencias con el mínimo esfuerzo.
- Tener conciencia de los inconvenientes que se mantendrían ocultos sin simulación.
- Analizar y resolver problemas acústicos antes de que surjan.
- Ahorrar tiempo y dinero evitando múltiples iteraciones en el lugar.
- Hacer uso de una extensa y de gran calidad base de datos de altavoces con el objetivo de encontrar la solución mas óptima.

Haciendo una descripción breve de las opciones que incluye el software podemos enumerar las siguientes:

- Modulo de dibujo y construcción.
- Integración con programas de diseño y CAD de terceros.
- Incluye una extensa base de datos de materiales de construcción y materiales acústicos.
- Incluye construcciones estándar como habitaciones, teatros, iglesias, etc.
- Cálculos de tiempos de reverberación.
- Optimización del tiempo de reverberación.
- Una amplia base de datos de fuentes de sonido.
- Posibilidad de añadir tus propias fuentes de sonido.
- Módulo para el análisis de fuentes de sonido.
- Control del sistema de sonido virtualmente.
- Agrupación de altavoces.
- Mapeado estándar y con reflexiones.
- Herramientas estadísticas.
- Estudios del patrón de reflexión y trazado de rayos.
- Sonda acústica.
- Aura (Analysis Utility for Room Acoustics), herramienta para simular de manera más precisa y real que la creada únicamente con mapeado estadístico. Permite el cálculo de todos los parámetros acústicos de salas definidos en UNE-EN ISO 3382:2008 (Norma internacional de medida de parámetros acústicos en recintos).
- Herramienta de simulación de escucha humana.
- Herramientas de presentación.

5.1 Construcción de la Casa de la Cultura de Sonseca

5.1.1.- Recopilación de datos necesarios.

Antes de empezar directamente a utilizar el software para la simulación de nuestro modelo, se tuvo que realizar una serie de pasos previos para familiarizarse con el entorno de trabajo. En primer lugar revisar manuales e interpretar casos sencillos, estudios de casos básicos, etc., con el fin de utilizar con soltura las herramientas ofrecidas por el software.

Una vez conocidos los datos necesarios para la construcción y simulación del recinto, tuvimos que conseguir el acceso a ellos. El recinto Casa de la Cultura de Sonseca, es un edificio municipal de la localidad de Sonseca (Toledo) y como tal pertenece al patrimonio del ayuntamiento de Sonseca.

Obtenidos los permisos de acceso al recinto por parte del personal responsable en el Ayuntamiento de Sonseca, se solicitaron los planos de construcción del edificio. Estos datos son vitales para poder realizar la simulación acústica.

Una vez podía contar con los planos, surge el primer inconveniente. El edificio se había construido en 3 fases, la primera de ellas correspondía al patio de butacas actual, sin el escenario. La segunda fase a una ampliación del patio de butacas incluyendo el escenario. Y la tercera fase el recubrimiento del escenario con la bóveda de madera. Por consiguiente, se tuvo que realizar la composición final del edificio y de esta manera tener localizadas las medidas necesarias para nuestro caso.

Los datos principales extraídos de los planos del arquitecto para la simulación acústica han sido: las medidas (cotas) necesarias para replicar la construcción en el software y los materiales del enfoscado de cada una de las paredes que estuvieran en contacto directo o indirecto con la onda sonora. Identificar estos materiales es clave para poder indicarle al software las características acústicas (absorción y reflexión) de dichos materiales contra los que chocarán las ondas sonoras. Para ello, nos centramos principalmente en los planos de la planta del patio y los distintos perfiles del mismo.



Fig 5.2 Plano de planta del patio de butacas

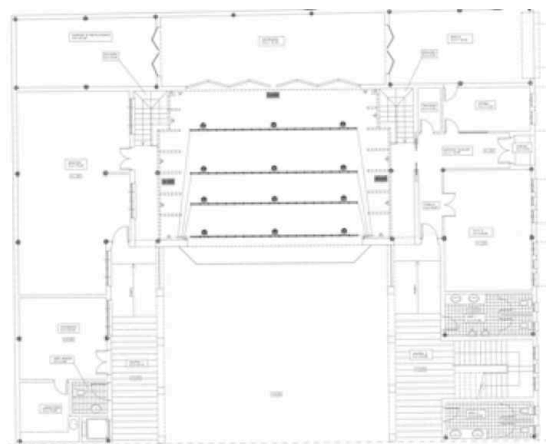


Fig 5.3 Plano de planta del escenario



Fig 5.4 Plano de alzados del escenario



Fig 5.5 Plano de alzados del escenario y ampliación del patio



Fig 5.6 Plano de alzado de la fachada interior norte.

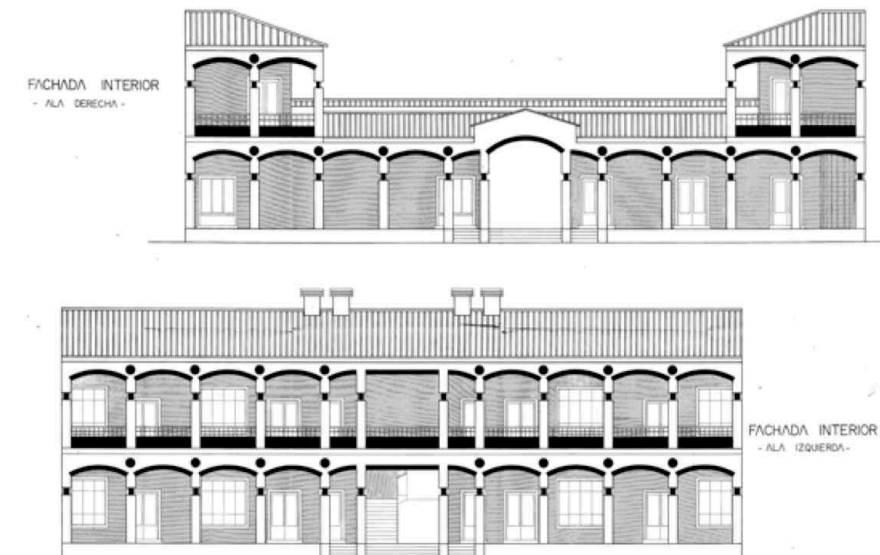


Fig 5.7 Plano de alzados de las fachadas interiores

Cabe citar que, aunque se contaba con los planos, los cuales incluían las cotas, puesto que puede haber diferencias entre lo proyectado y lo ejecutado, se procedió a realizar una serie de medidas en el recinto construido para corroborar las dimensiones indicadas en plano.

5.1.2.- Construcción del modelo.

Una vez localizadas las medidas necesarias para el diseño comenzamos a levantar el edificio en el software y dentro de la parte que éste tiene específica para el modelado y construcción de recintos. El proceso comenzó con la creación de la base del edificio e intentando realizar un primer modelo muy básico con las medidas reales pero pocos detalles. Para ello fuimos construyendo las diferentes caras del modelo situando los puntos vértices de cada cara en su posición, siendo los resultados obtenidos los siguientes:

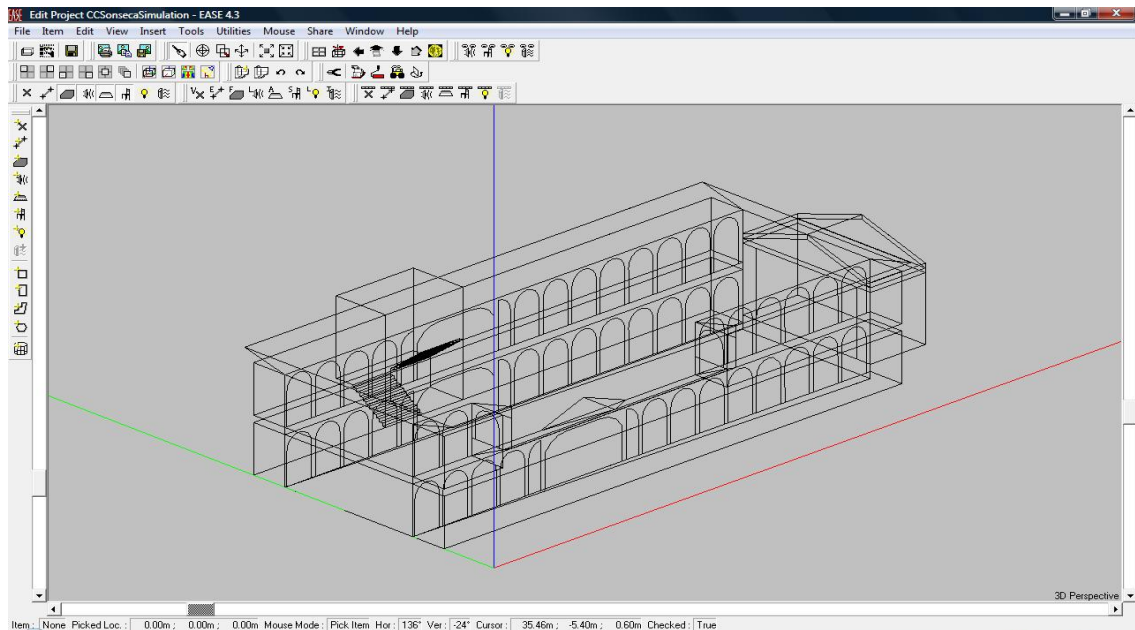


Fig. 5.8 Figura del esqueleto del edificio vista 1

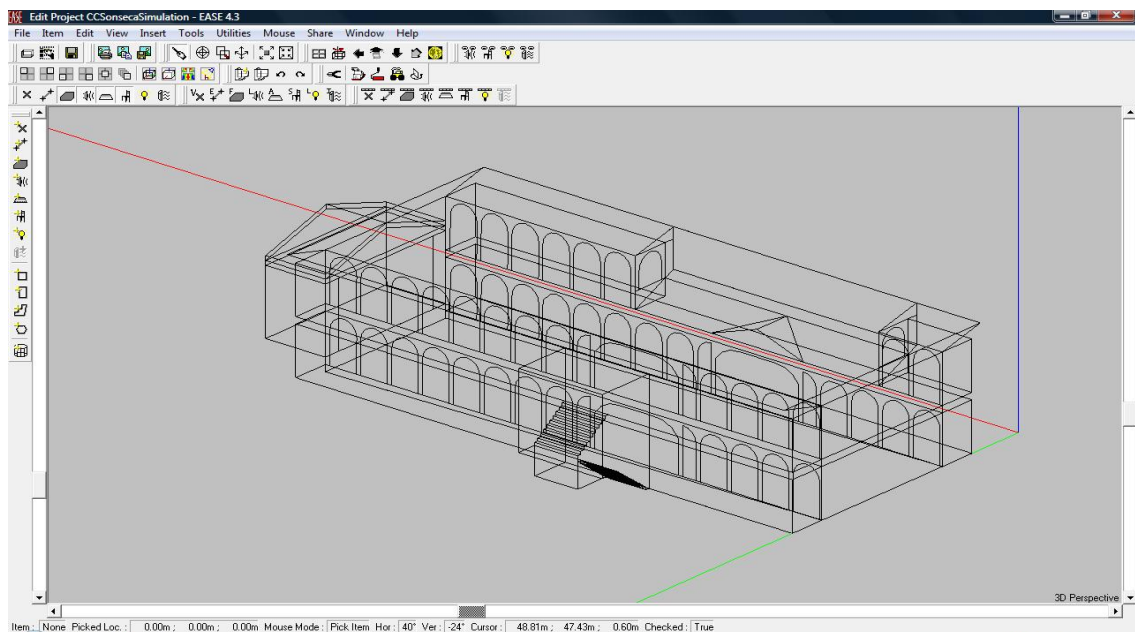


Fig. 5.9 Figura del esqueleto del edificio vista 2

Con este primer modelo logramos representar las partes fundamentales del modelo final y principales zonas de estudio del trabajo. El patio de butacas donde se situará la audiencia, los corredores laterales de la planta principal y primer nivel que están separados por una pared arqueada del patio principal y por último el escenario.

Una vez obtenido este primer modelo comenzamos a profundizar en los detalles de cada una de las zonas nombradas anteriormente, incluyendo en el diseño: la pasarela de la pared contraria al escenario, el poyete entre columnas, las escaleras de comunicación entre las dos plantas, la entrada principal al recinto, las vigas de

madera que sujetan el techo del escenario y la colocación de las ventanas y puertas a lo largo de los corredores que dan acceso a las distintas dependencias colindantes.

Es importante destacar que debemos establecer una superficie para las partes de nuestro recinto que corresponden al aire libre, es decir, el techo del patio de butacas, la superficie vertical por encima del tejado del escenario y por encima de la pared contraria al escenario, y por ultimo, la superficie que corresponde a la puerta principal. EASE establece que el recinto en su construcción debe ser un recinto cerrado completamente, debido a la necesidad del cálculo de un volumen de recinto para los cálculos específicos pertinentes y para poder computar las reflexiones que se lanzan contra todas las superficies del recinto . De cara a la obtención del volumen, estas superficies nos sirven de cota, pero a la hora de la simulación y cálculos de tiempo de reverberación hemos asignado a dichas superficies el coeficiente de absorción máximo, igual a 1, posibilitando de esta forma que se simule la situación real, en la que las ondas escapan del recinto sin reflexión alguna.

Una vez completos todos los detalles de nuestro recinto, éste ha sido el resultado:

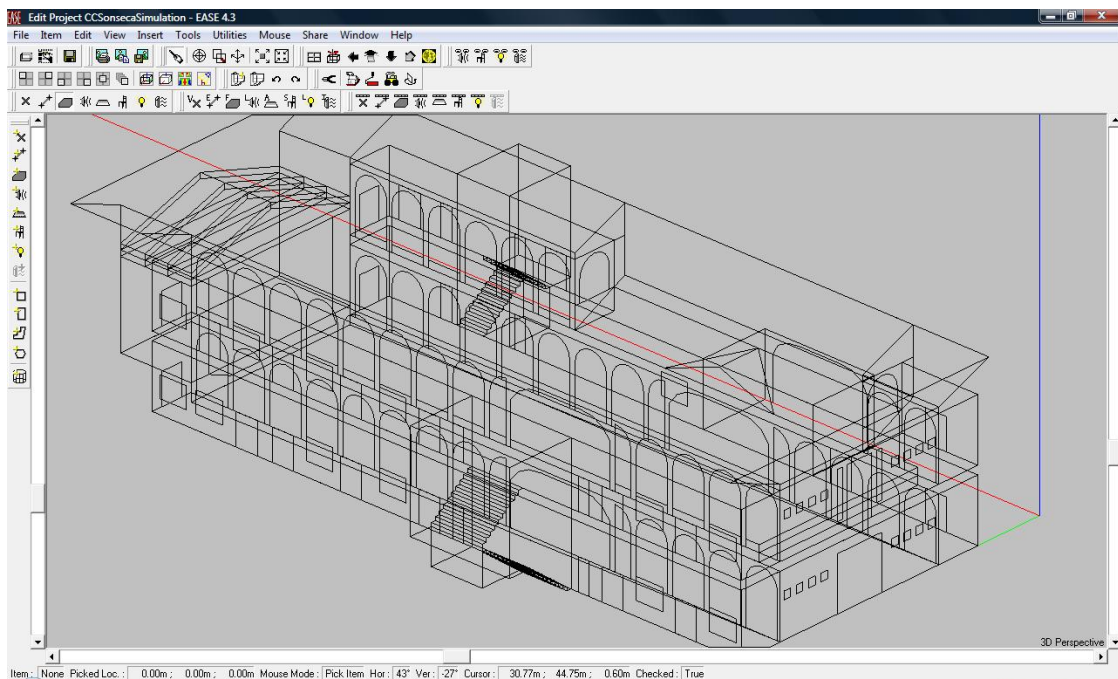


Fig 5.10 Figura del modelo final

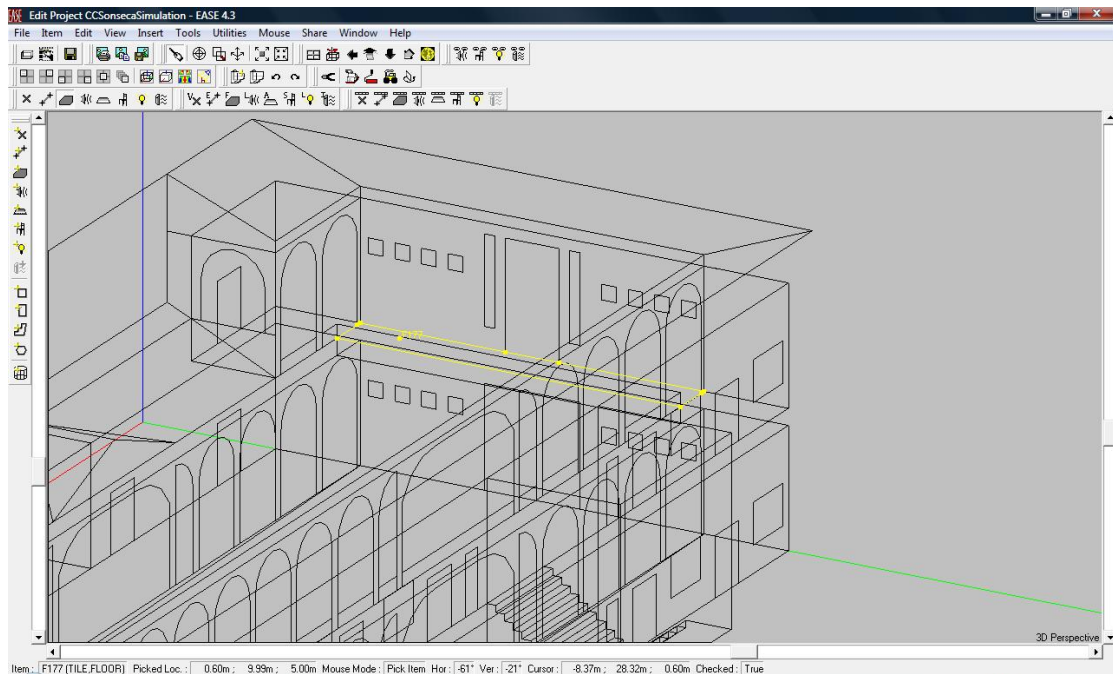


Fig 5.11 Detalle de la pasarela, ventanas y puertas en la pared norte

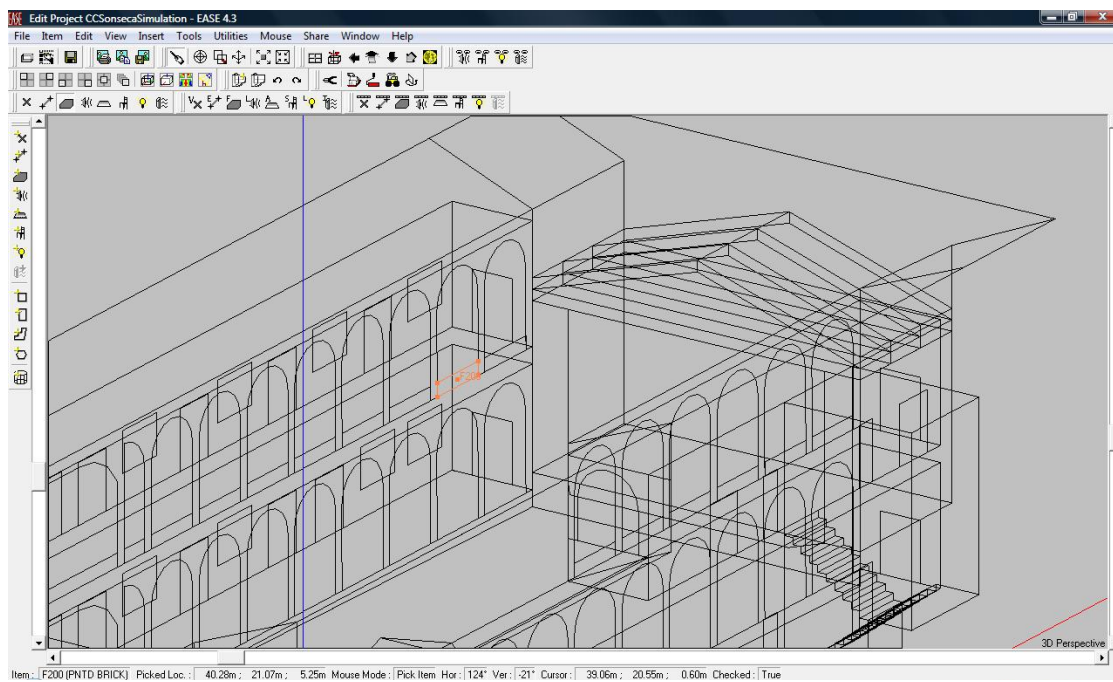


Fig 5.12 Detalle del poyete entre columnas

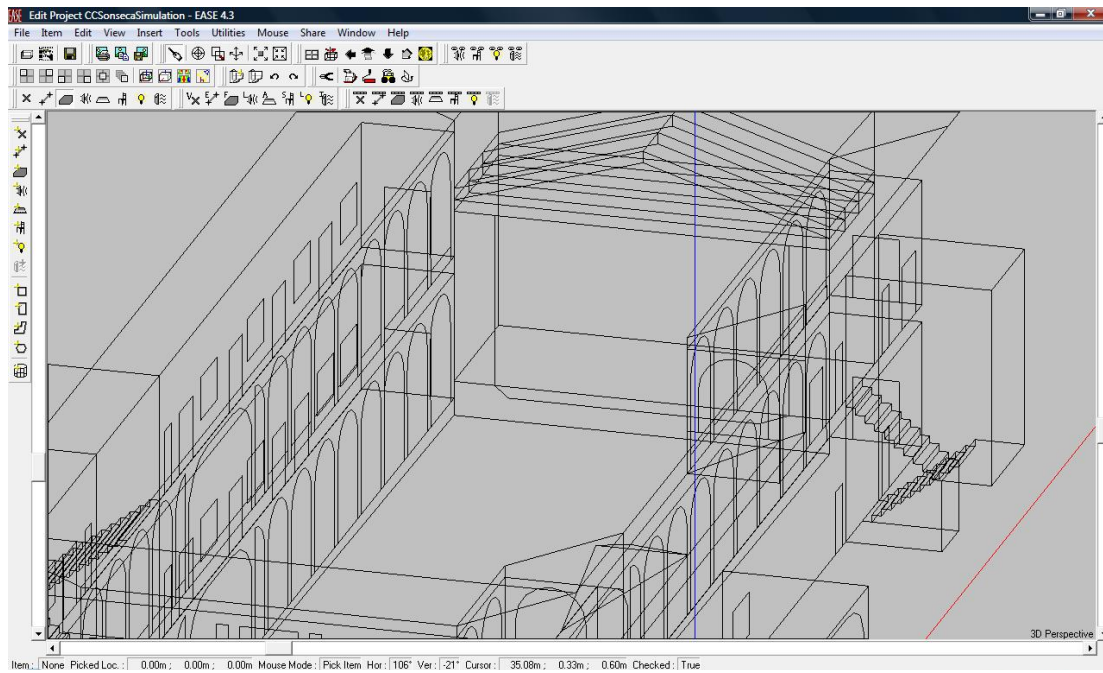


Fig 5.13 Escaleras de acceso al piso superior

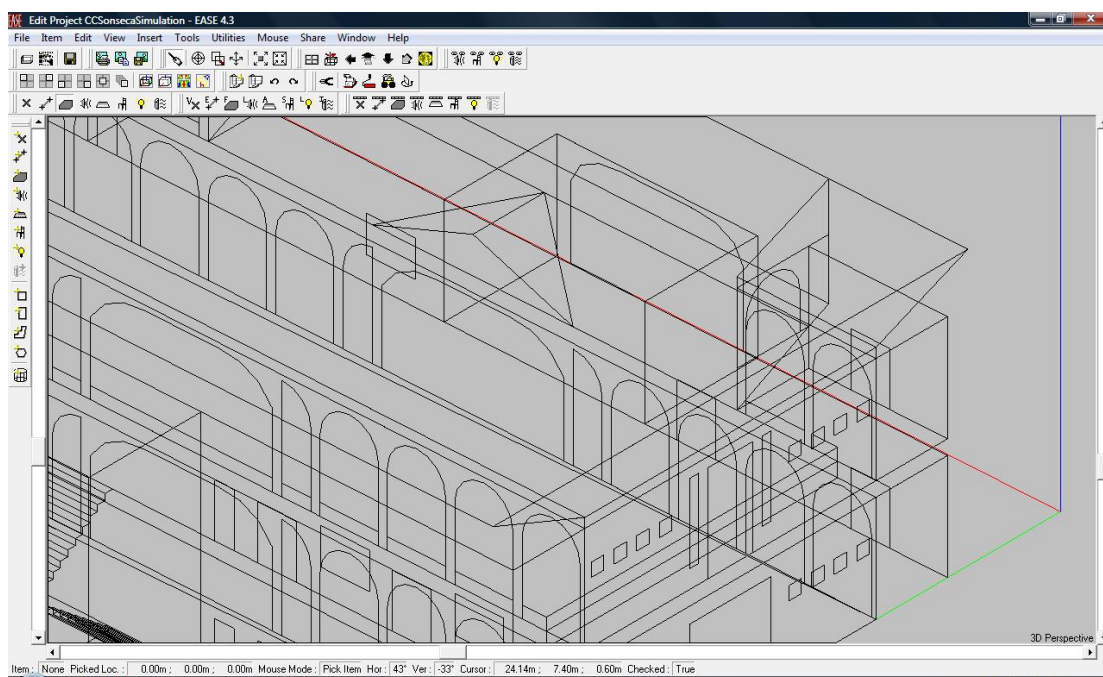


Fig 5.14 Entrada principal al recinto vista 1

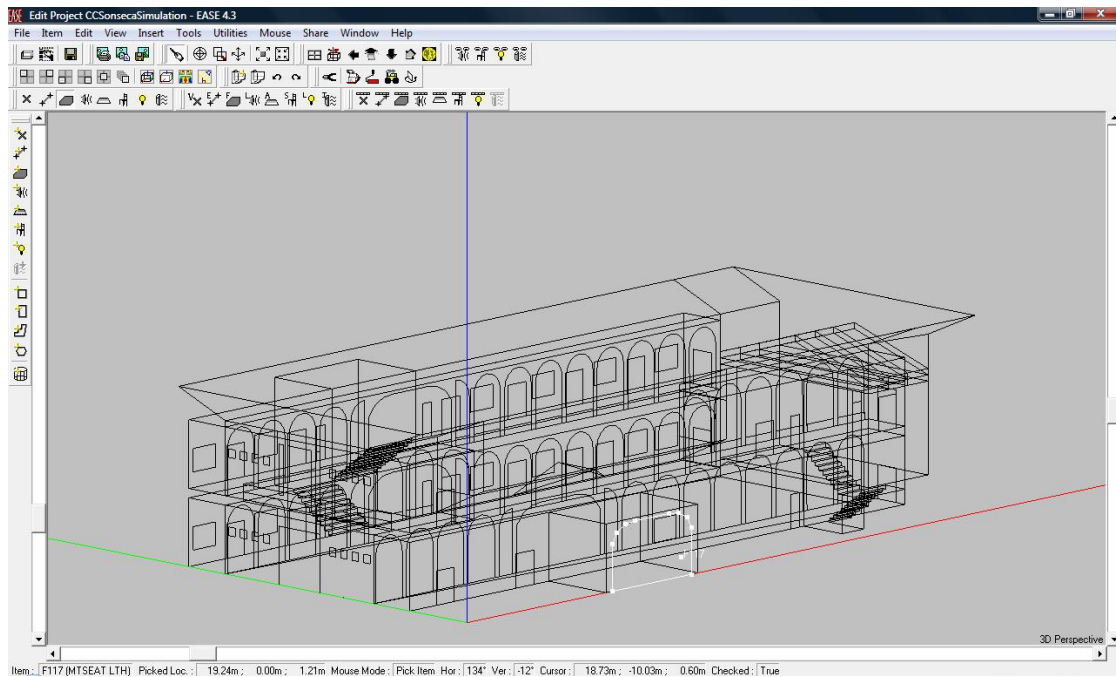


Fig 5.15 Entrada principal al recinto vista 2

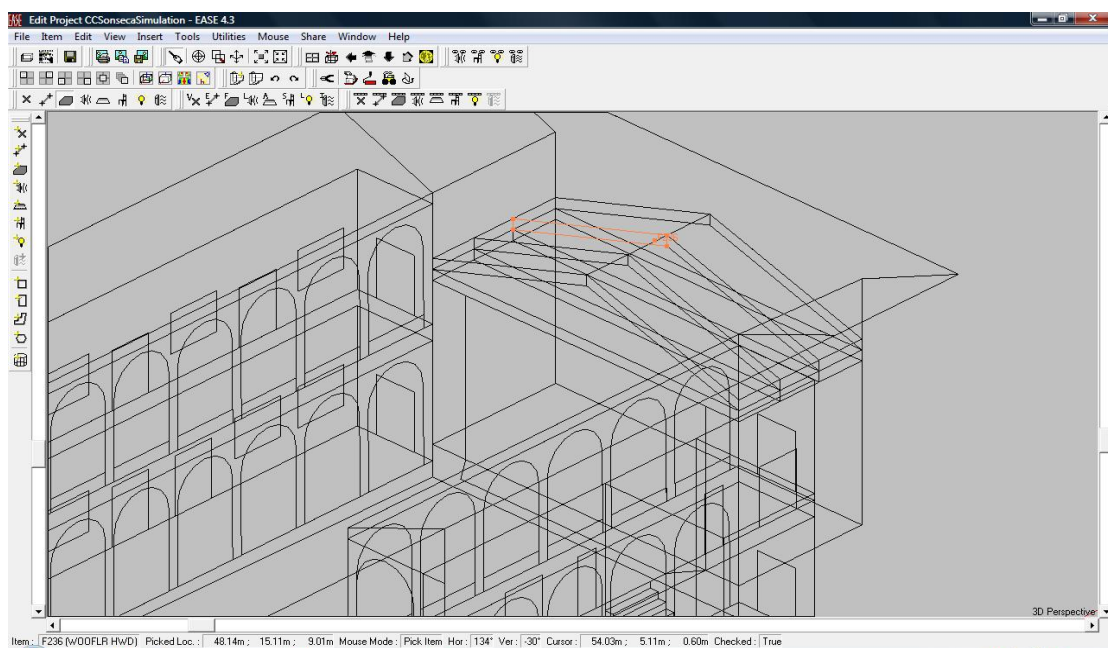


Fig 5.16 Detalle de las vigas de madera del escenario

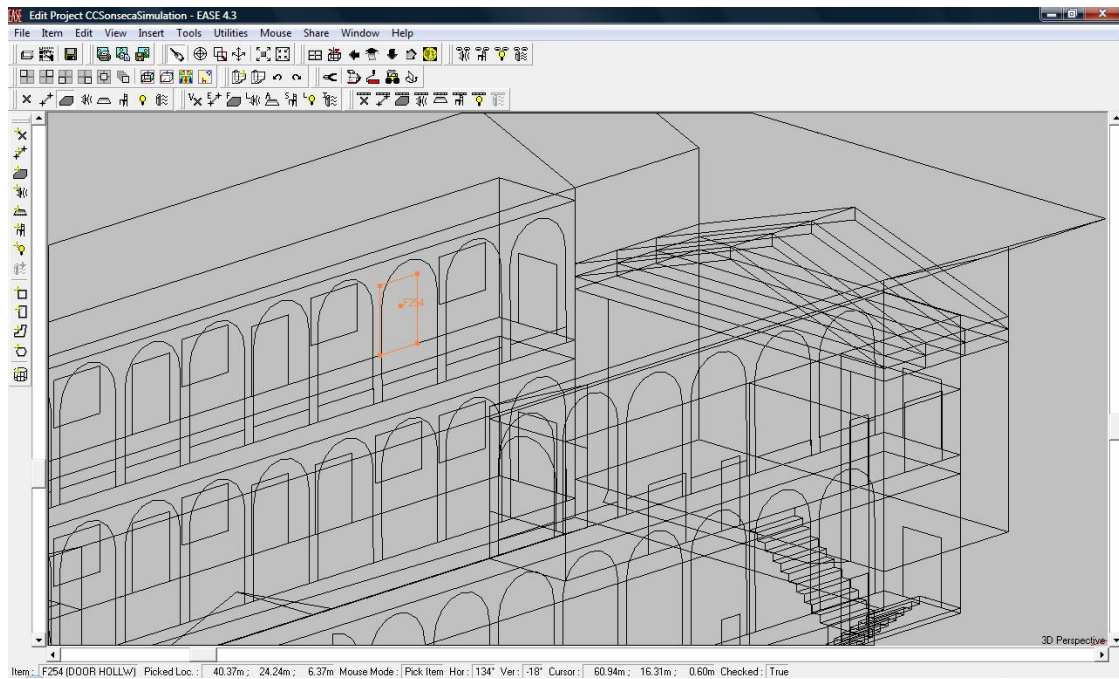


Fig 5.17 Puertas de las dependencias colindantes

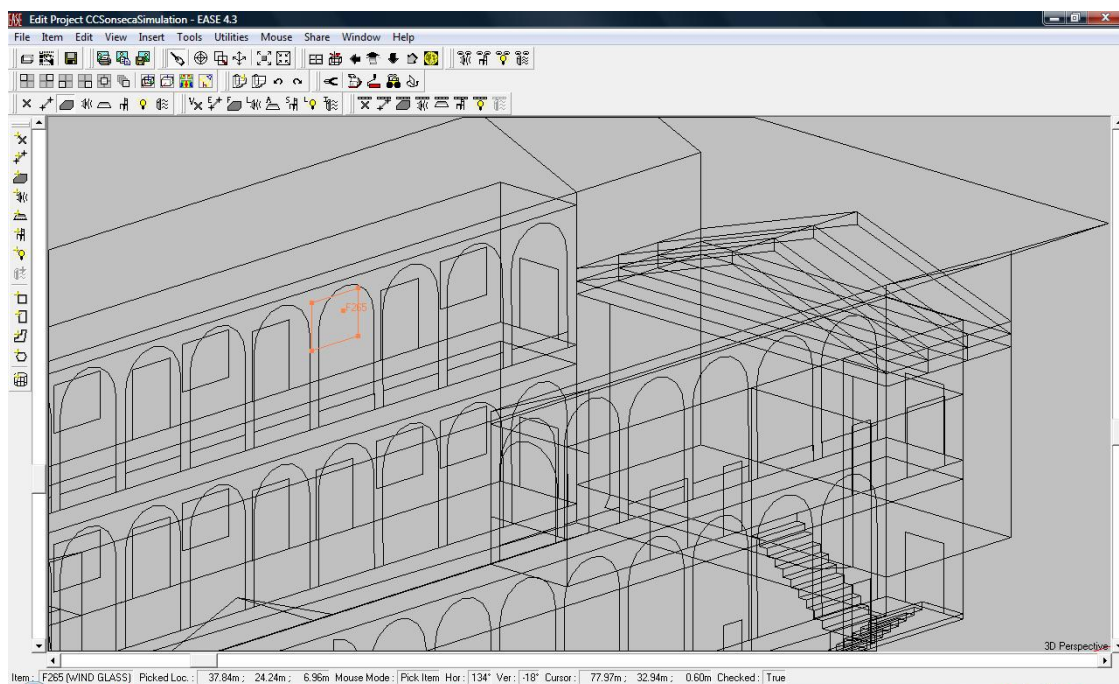


Fig 5.18 Ventana de las dependencias colindantes

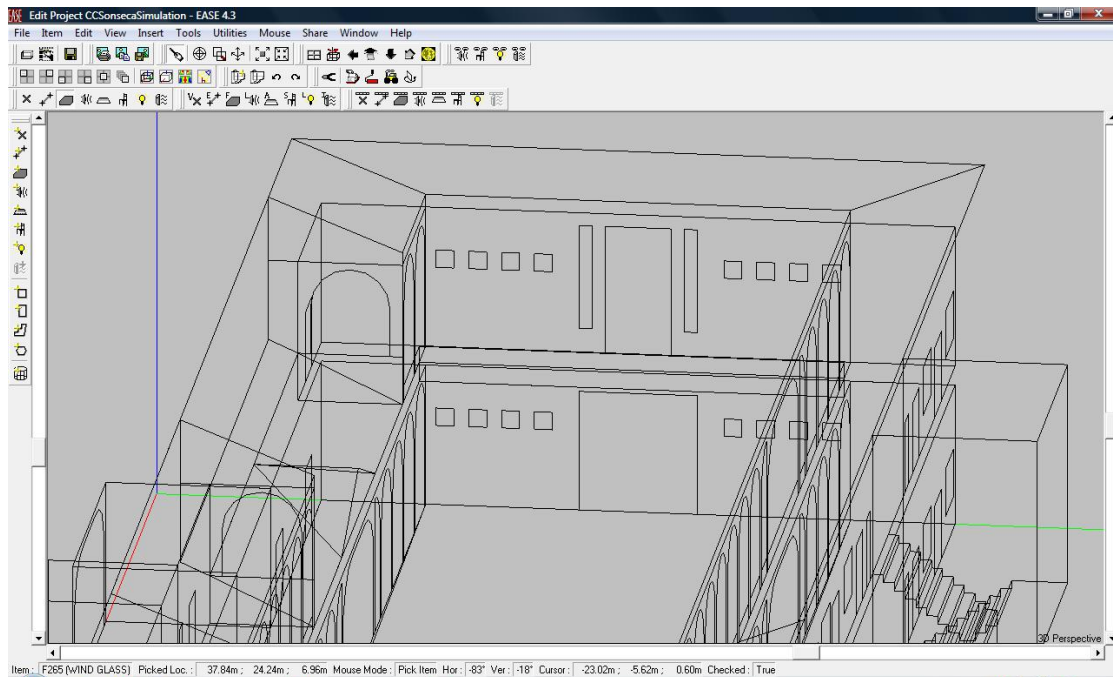


Fig 5.19 Puertas de las dependencias colindantes fachada norte

Este método de construcción del recinto ha resultado extremadamente laborioso, puesto que cada superficie requiere de su dibujo individual, y el modelo total debe quedar completamente cerrado, es decir, no debe haber huecos en el modelo 3D, lo que hace que se deba tener extremado cuidado para que los límites de las superficies coincidan entre sí. Sin embargo, nos da la seguridad de poder concluir el modelo correctamente y nos ofrece resultados adecuados en función de los datos reales.

Cabe citar que el modelo final está compuesto por 1198 vértices y 294 caras correspondientes al recinto, de éstas últimas podremos ver sus características (coordenadas, área, material del que se compone, textura, etc.) seleccionando la cara de interés y accediendo a su panel de propiedades.

De nuevo, es necesario recalcar que cada uno de estos vértices y caras ha tenido que ser insertado en el modelo de forma manual, ajustando exactamente sus coordenadas para acabar construyendo un modelo que permita al software saber sobre qué superficies debe lanzar los rayos acústicos y como deben reflejarse. De esta forma, el software nos permite obtener las diferentes magnitudes acústicas que describen el comportamiento del recinto simulado.

Imágenes del modelo completo:

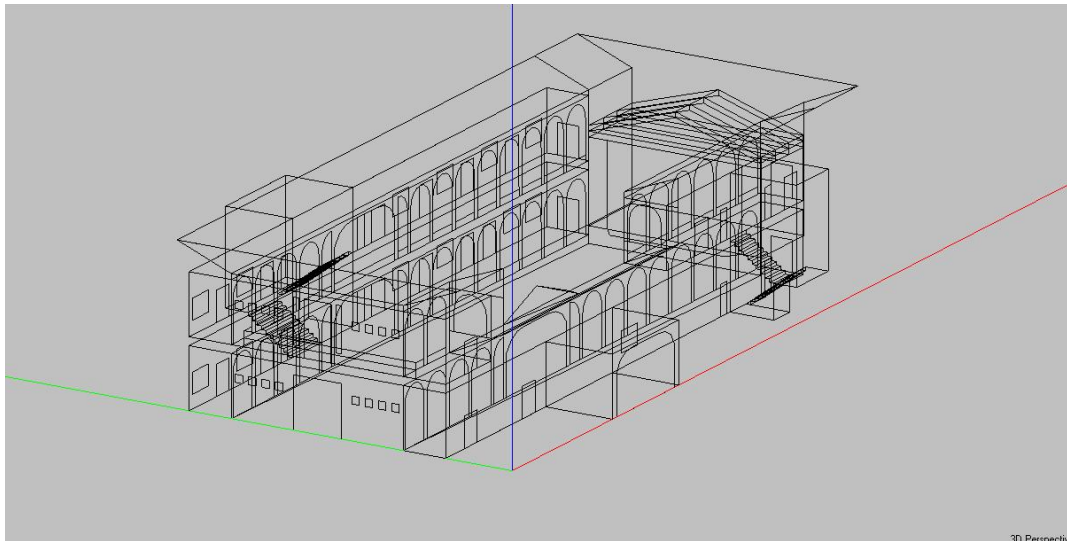


Fig 5.20 Modelo Casa de la Cultura de Sonseca vista 1

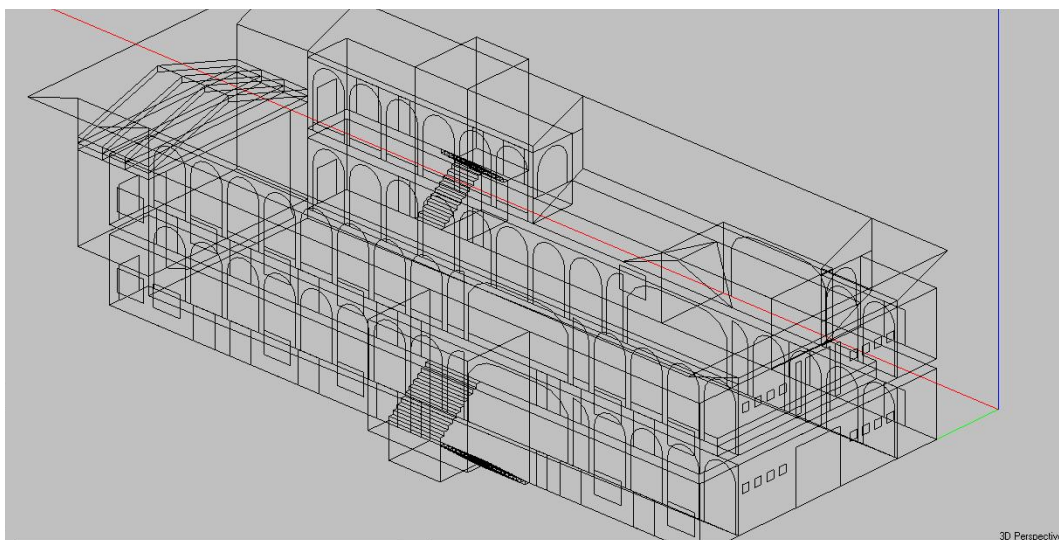


Fig 5.21 Modelo Casa de la Cultura de Sonseca vista 2

A continuación se muestran dos imágenes del modelo donde se representa cada material con su color asociado.

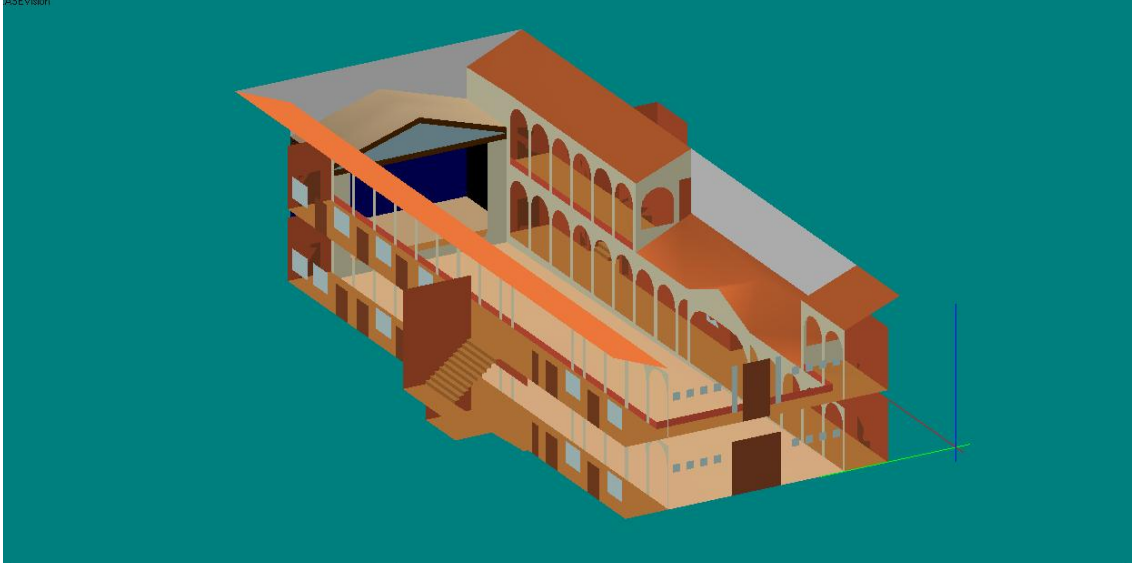


Fig 5.22 Modelo Casa de la Cultura de Sonseca vista 3



Fig 5.23 Modelo Casa de la Cultura de Sonseca vista 4

5.1.3.- Materiales

Una vez construido el esqueleto del modelo final, he asignado un material a cada una de las superficies que lo componen. Para ello recurrimos de nuevo a los planos del arquitecto donde se exponen algunos de los materiales.

TBC	TABICON DE LADRILLO HUECO DOBLE
MLM	MURO DE CERRAMIENTO 1/2 PIE LADRILLO MACIZO AISLAMIENTO FIBRA VIDRIO TABIQUE INTERIOR ENFOSCADO Y PINTADO EXTERIOR
MCV	MURO CARA VISTA 1/2 PIE LADRILLO ERA, CARA VISTA, REVOCO AISLAMIENTO FIBRA DE VIDRIO INTERIOR TABIQUE INTERIOR
MA	MACHONES Y ARCOS MACHONES DE 1.1/2 PIE LADRILLO MACIZO ARCOS DE 1 PIE LADRILLO MACIZO ENFOSCADO PINTURA DE EXTERIORES
ARC	ARCO REBAJADO DE 1 PIE LADRILLO DE ERA, CARA VISTA

Fig 5.24 Listado materiales 1

+ S:	SOLADO 40x40 cm. PIEDRA ARTIFICIAL, CHINA, LAVADA, TRICOLOR
+ SGE:	SOLADO GRES 20 x 30 cm. BANDAS GRES 11 x 21 cm. RODAPIE GRES 21 cm.
+ SG	SOLADO GRES 11 x 21 cm
+ SB	SOLADO DE CERAMICA COCIDA 40 x 40 cm. RODAPIE 7 cm. altura, AZULEJO TALAVERANO
+ SES	SOLADO GRES 20 x 30 cm. MAMPERLAN: MADERA ALAMO 10 cm. ZANQUIN GRES 20 x 30 cm., EN LINEA
+ E	PELDAÑO PIEDRA DE GRANITO SIN PULIR EN HUELLA Y TABICA
+ PI	PELDAÑO PIEDRA DE GRANITO SIN PULIR Y TABICA DE CERAMICA COCIDA
+ VI	VIERTEAGUAS DE GRANITO SIN PULIR 3 cm.
+ V2	VIERTEAGUAS DE MARMOL 3 cm.
+ AL	ALICATADO GRES 11 x 21 cm.

Fig 5.25 Listado materiales 2

M, VE, VL, V3, V4	PDI, PSI
CARPINTERIA DE MADERA EN PINO BALSAIN DE 1*	
BARNIZADO DE EXTERIORES	
PREMARCOS EN PINO DE 2* SIN TERMINACION	
PS2	
CARPINTERIA DE MADERA CHAPADA EN PINO BALSAIN	
BARNIZADO	
PREMARCOS EN PINO DE 2* SIN TERMINACION	
PDC	
CARPINTERIA DE TUBO DE ACERO Y PLETINAS	
MINIADO Y PINTADO AL OLEO	
FT	
ALERO DE TABLA BALSAIN MACHICHEMBRADA	
BARNIZ DE EXTERIORES	
VP	
VIDRIO PLANO 4/6 m.m.; INCOLORO	
VPR	
VIDRIO PARSOL 4m.m. CLARO	

Fig 5.26 Listado materiales 3

Con estos datos, junto con el acceso al recinto y comprobaciones in situ, hicimos una recopilación de todos los materiales necesarios para nuestro modelo. Ahora que tenemos el modelo construido le otorgamos a cada superficie su material, para ello, nos basamos principalmente en la amplia base de datos de materiales que incluye EASE. A continuación muestro una tabla resumen con todos los materiales utilizados y su identificador EASE.

	Elemento	Materiales Reales	Material EASE
Techos	Pasillos	Bovedilla cerámica	PLAST LTHS
	Escenario	Laminas de madera	WOOD GRID1
	Vigas escenario	Madera	WOOF LR HWD
	Techo del patio	Aire libre	ABSORBER
Tejados	Tejado pasillos	Tejas cerámicas	TECTUM1A
	Tejado escenario	Chapa plegada	STEEL
Suelos	Pasillos	Gres	TILE FLOOR
	Patio butacas	Terrazo exterior granallado	TERRAZZO
	Escenario	Parquet	PARQT CON
	Suelo pasarela	Gres	TILE FLOOR
	Escaleras	Gres	TILE FLOOR
Paredes	Paredes interiores	½ Pie ladrillo de era	BRICK UNGLAZED - > UNGL BRICK
	Pared Fondo	½ Pie ladrillo de era	BRICK UNGLAZED - > UNGL BRICK
	Escenario laterales	Ladrillo revocado + yeso pintado	PLAST LTHS
	Escenario fondo	Cortina tela trevira	DRAPE MED
	Tabiques del escenario	½ Pie ladrillo revocado	PLAST LTS
	Columnas	1 Pie ladrillo macizo enfoscado pintura exterior	PNTD BRICK
	Metacrilato frontal escenario	Metacrilato	WINDOW SP
	Poyete del entrecolumnado	1 Pie ladrillo macizo enfoscado pintura exterior	PNTD BRICK
Puertas	Puertas	Madera pino Balsaín barnizado	Door HOLLW
Ventanas	Ventanas	Vidrio Parsol 4mm	WIND GLASS

Tabla 5.1 Listado de materiales

Enfatizando en las características de cada material en concreto, a continuación se muestra la gráfica de absorción de cada uno de los materiales utilizados.

Podemos ver como ninguno de los materiales tiene un fin acústico concreto ya que como expusimos en el capítulo de presentación del edificio, en ningún momento, el edificio fue construido como auditorio si no que fue incluido en las últimas reformas del complejo como algo accesorio. Por ello, ningún material destaca por tener un coeficiente de absorción acústica específico con algún fin determinado.

Si observamos las gráficas de absorción de los distintos materiales vemos como todos tienen principalmente un carácter reflector y de poca absorción, al ser

materiales duros. El único material que ha sido incluido con un fin acústico, ha sido la tela trevira que cubre el fondo del escenario. Dicho material es el encargado de absorber las ondas que se proyecten hacia atrás del escenario evitando posibles reflexiones molestas para los intérpretes.

TECHOS:

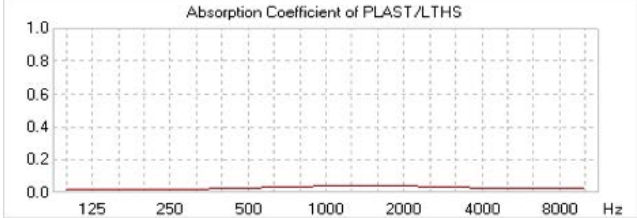
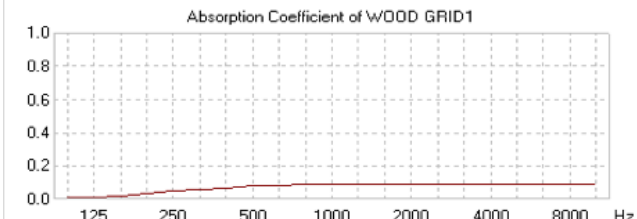
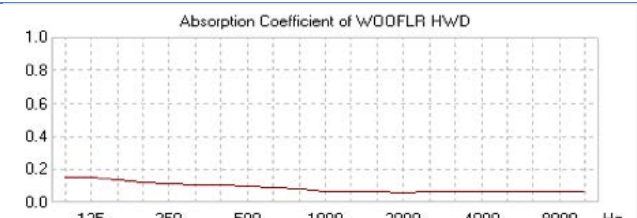
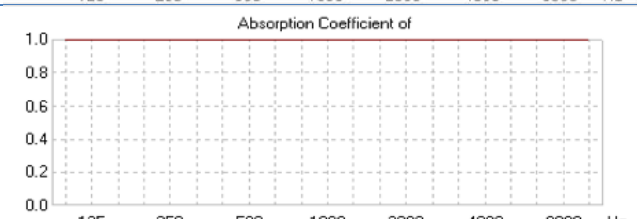
Pasillos	Bovedilla cerámica	PLAST LTHS	 <p>Absorption Coefficient of PLAST/LTHS</p> <p>The graph shows the absorption coefficient of PLAST/LTHS across a frequency range from 125 Hz to 8000 Hz. The y-axis represents the absorption coefficient from 0.0 to 1.0. The curve is nearly flat and close to 0.0 across the entire frequency range.</p>
Escenario	Laminas de madera	WOOD GRID1	 <p>Absorption Coefficient of WOOD GRID1</p> <p>The graph shows the absorption coefficient of WOOD GRID1 across a frequency range from 125 Hz to 8000 Hz. The y-axis represents the absorption coefficient from 0.0 to 1.0. The curve starts near 0.0 at 125 Hz and gradually increases to approximately 0.1 at 8000 Hz.</p>
Vigas escenario	Madera	WOOFLR HWD	 <p>Absorption Coefficient of WOOFLR HWD</p> <p>The graph shows the absorption coefficient of WOOFLR HWD across a frequency range from 125 Hz to 8000 Hz. The y-axis represents the absorption coefficient from 0.0 to 1.0. The curve starts at approximately 0.15 at 125 Hz and decreases steadily to near 0.0 at 8000 Hz.</p>
Techo del patio	Aire libre	ABSORBER	 <p>Absorption Coefficient of</p> <p>The graph shows the absorption coefficient of the ABSORBER across a frequency range from 125 Hz to 8000 Hz. The y-axis represents the absorption coefficient from 0.0 to 1.0. The curve is a flat line at 1.0 across the entire frequency range.</p>

Tabla 5.2 Materiales techo

TEJADOS:

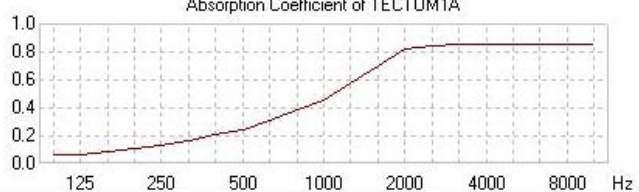
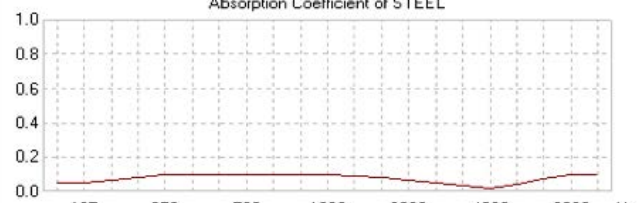
Tejado pasillos	Tejas cerámicas	TECTUM1A	 <p>Absorption Coefficient of TECTUM1A</p> <p>The graph shows the absorption coefficient of TECTUM1A across a frequency range from 125 Hz to 8000 Hz. The y-axis represents the absorption coefficient from 0.0 to 1.0. The curve starts at approximately 0.05 at 125 Hz, rises steadily to about 0.8 at 2000 Hz, and then remains constant at 0.8 up to 8000 Hz.</p>
Tejado escenario	Chapa plegada	STEEL	 <p>Absorption Coefficient of STEEL</p> <p>The graph shows the absorption coefficient of STEEL across a frequency range from 125 Hz to 8000 Hz. The y-axis represents the absorption coefficient from 0.0 to 1.0. The curve remains very low, starting at approximately 0.05 at 125 Hz, peaking slightly at 0.1 around 250 Hz, and then fluctuating between 0.05 and 0.1 across the entire frequency range.</p>

Tabla 5.3 Materiales tejado

SUELOS:

Pasillos, suelo pasarela, escaleras	Gres	TILE FLOOR	 <p>Absorption Coefficient of TILE,FLOOR</p> <p>The graph shows the absorption coefficient of TILE,FLOOR across a frequency range from 125 Hz to 8000 Hz. The y-axis represents the absorption coefficient from 0.0 to 1.0. The curve is nearly flat and remains very close to 0.0 across the entire frequency range.</p>
Patio de butacas	Terrazo exterior granallado	TERRAZZO	 <p>Absorption Coefficient of TERRAZZO</p> <p>The graph shows the absorption coefficient of TERRAZZO across a frequency range from 125 Hz to 8000 Hz. The y-axis represents the absorption coefficient from 0.0 to 1.0. The curve is nearly flat and remains very close to 0.0 across the entire frequency range.</p>
Escenario	Parquet	PARQT CON	 <p>Absorption Coefficient of PARQT CON</p> <p>The graph shows the absorption coefficient of PARQT CON across a frequency range from 125 Hz to 8000 Hz. The y-axis represents the absorption coefficient from 0.0 to 1.0. The curve is nearly flat and remains very close to 0.0 across the entire frequency range.</p>

Tabla 5.4 Materiales suelos

PAREDES:

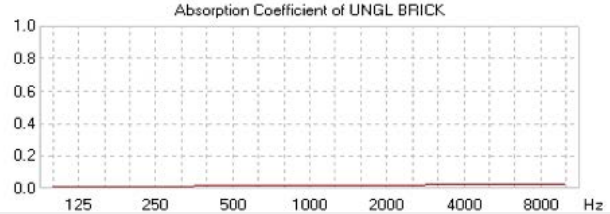
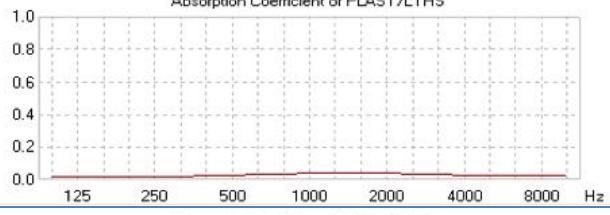
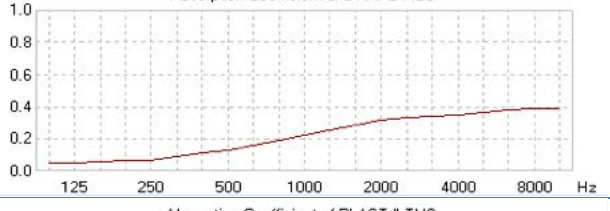
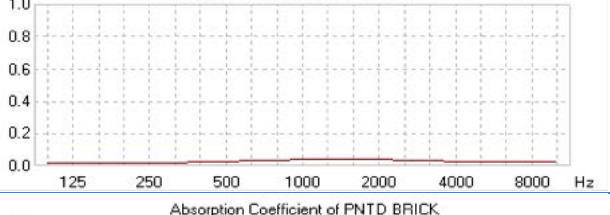
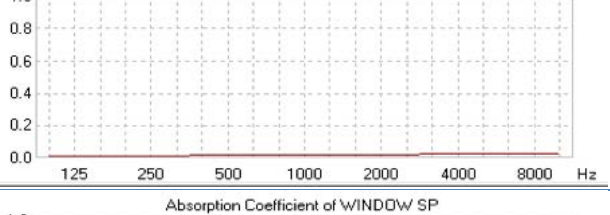
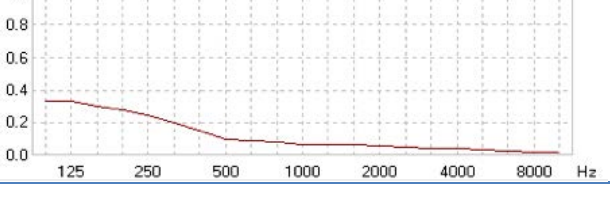
Paredes interiores, pared del fondo	½ Pie ladrillo de era	BRICK UNGLAZED -> UNGL BRICK	 <p>Absorption Coefficient of UNGL BRICK</p>
Escenario laterales	Ladrillo revocado + yeso pintado	PLAST LTHS	 <p>Absorption Coefficient of PLAST/LTHS</p>
Escenario fondo	Cortina tela trevira	DRAPE MED	 <p>Absorption Coefficient of DRAPE MED</p>
Tabiques del escenario	½ Pie ladrillo revocado	PLAST LTS	 <p>Absorption Coefficient of PLAST/LTHS</p>
Columnas, pollete ente columnas	1 Pie ladrillo macizo enfoscado pintura exterior	PNTD BRICK	 <p>Absorption Coefficient of PNTD BRICK</p>
Metacrilato frontal escenario	Metacrilato	WINDOW SP	 <p>Absorption Coefficient of WINDOW SP</p>

Tabla 5.3 Materiales suelos

PUERTAS:

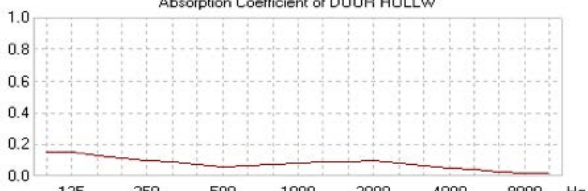
Puertas	Madera de pino balsaín barnizado	DOOR HOLLW	
----------------	--	------------	--

Tabla 5.4 Materiales puertas

VENTANAS:

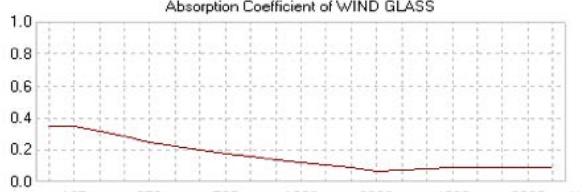
Ventanas	Vidrio Parsol de 4mm	WIND GLASS	
-----------------	----------------------------	------------	--

Tabla 5.2 Materiales ventanas

Tras varias consideraciones, hemos decidido añadir un material a las superficies verticales que corresponden a: la puerta de entrada al recinto, la parte por encima del tejadillo donde no existe pasillo superior en el ala izquierda del recinto y las superficies que suben por encima del tejado en los fondos norte y sur. Dicho material se compone del siguiente gráfico de absorción:

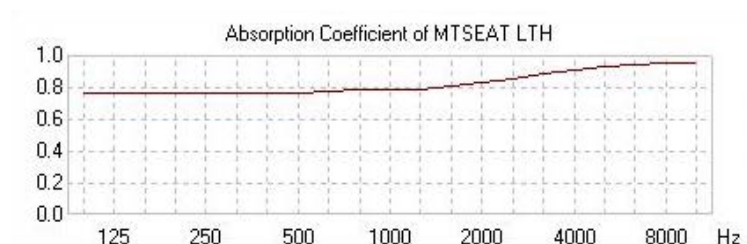


Fig 5.27 Coeficiente de absorción MTSEAT LTH

Estas superficies corresponden a aire libre pero hemos considerado no otorgarle un nivel total de absorción ya que en las proximidades se encuentran edificios y de esta manera focalizar el análisis de absorción total al techo imaginario del recinto.

Una vez construido el modelo y establecidos los materiales de cada una de sus superficies podemos proceder al ajuste del mismo. El ajuste del modelo consiste en la aproximación del modelo construido a la situación real. Es decir, se trata de ajustar diferentes características del modelo para que éste se parezca lo más posible a la situación real. De entre todas las características posibles, la que

normalmente se modifica al ajustar el modelo es la absorción de ciertas superficies, puesto que normalmente, en las bases de datos del software no se dispone de un material exactamente igual al utilizado en la construcción del recinto, o, incluso, se desconocen las características acústicas de materiales empleados en recintos contruidos. Esta aproximación se lleva a cabo modificando los coeficientes preestablecidos en las tablas anteriores de manera que el edificio se comporte con unos resultados próximos a la realidad. Los resultados de valores de los coeficientes finales, se mostrarán en los capítulos próximos.

Para finalizar este apartado, cabe hablar de una superficie especial: la zona de audiencia. Cuando el recinto está lleno para asistir a un evento, las características de la superficie del suelo de la audiencia varían, al incluir la absorción acústica del propio público. Sin embargo, puesto que las medidas “in situ” realizadas para ajustar el modelo se realizaron con el recinto vacío, ésta ha sido la situación que se ha considerado en la simulación. Incluir la absorción del público en la publicación es sencillo, modificando la absorción de esta superficie de forma que se incluya la absorción de la audiencia. Ésta última apreciación nos deja abierta una nueva línea de trabajo futuro.

6. Mediciones acústicas en el recinto real: Ensayos “in situ”

Una vez que tenemos construido el modelo en nuestro software de simulación EASE tenemos que ajustarlo en la mayor medida de lo posible para que represente con proximidad el modelo real. Esta fase se denomina ajuste del modelo y como su propio nombre indica consiste en, retocar los valores que hemos establecido como coeficientes de absorción de los distintos materiales y sus factores de scattering (valor que representa la probabilidad de que, al chocar un rayo con una superficie, el rayo reflejado no siga exactamente la ley de Snell, es decir, el ángulo de reflexión no sea exactamente el de incidencia, sino que la dirección de salida pueda ser diferente), en función de los resultados reales obtenidos de las medidas del ensayo in situ con el fin de obtener unos valores próximos simulados-medidos.

Para ello, hemos medido en el recinto real el tiempo de reverberación y el nivel de presión para representar su distribución.

Para realizar el ensayo de las medidas oportunas en el recinto, tuve que solicitar un permiso de acceso al recinto para la realización del ensayo y la disponibilidad del mismo única y exclusivamente para el equipo de medida, ya que no se podría estar realizando ninguna actividad simultánea que pudiera afectar a las medidas realizadas.

Acordamos el 23 de Julio de 2014 para realizar las mediciones.

Debíamos tener en cuenta que estábamos muy restringidos en cuanto al tiempo de medición ya que disponíamos sólo con un periodo de 6 horas y debíamos cubrir un recinto de unas dimensiones considerablemente grandes. Por ello el método que utilizamos no fue el más robusto (en cuanto a repetir varias veces las medidas en cada localización, con el objetivo de reducir la incertidumbre) pero nos permitió cubrir todo el recinto para poder obtener algunas conclusiones.

Descripción de las medidas:

Realizamos dos tipos de medidas diferentes, medidas de tiempo de reverberación en el recinto y medidas de distribución del nivel de presión sonora.

6.1 Medidas de tiempo de reverberación en el recinto:

Para el ensayo de estas medidas nos basamos en la norma UNE-EN ISO 3382:2009 “Medición de parámetros acústicos en recintos”. [11]

Esta norma UNE-EN ISO 3382:2009 (parte 2) especifica los métodos de medición del tiempo de reverberación, describiendo el procedimiento de medición, el equipo necesario, el número de posiciones de medición requerido y el método para evaluar los datos. [12]

Algunas consideraciones de la norma importantes a destacar son:

Generalidades:

En recintos de grandes dimensiones, la contribución del aire aporta absorción acústica para frecuencias altas, por ello medimos la temperatura y la humedad relativa del aire.

Sonseca 23 de Julio 2014:

- Temperatura: 33º
- Humedad: 41%
- Presión atmosférica: 1010 mb

Instrumentación de medida:

La norma establece una serie de instrumentación básica para la realización del ensayo de tiempo de reverberación en el recinto.

- Fuente acústica:

La fuente debe de ser lo mas omnidireccional posible, y debe producir un nivel de presión acústica suficiente para generar curvas de decrecimiento con el rango dinámico mínimo requerido sin contaminación por ruido de fondo.

La fuente acústica utilizada en nuestro ensayo es una fuente dodecaédrica omnidireccional y con una respuesta en frecuencia razonablemente plana. Con esta fuente conseguimos la radiación en todas las direcciones.



6.1 Fuente acústica omnidireccional.

- Calibrador acústico:

Dispositivo electroacústico utilizado para comprobar la calibración de los equipos de medida. Se compone de una cavidad donde se inserta el micrófono aislándolo del exterior, dentro de ésta se emite un tono estable de 1 kHz a 94 dB de nivel de presión, valor de referencia que debe reflejar el sistema de medida.



6.2 Calibrador acústico

- Amplificador de potencia:

Para alimentar la fuente sonora necesitamos amplificar la señal previamente mediante un amplificador de potencia. Para ello hemos utilizado un amplificador de potencia de la marca Crest Audio modelo CA6, modelo que ofrece una potencia por canal de 400 W a 8 Ω .



6.3 Amplificador de potencia Cres Audio

- Generador de Ruido:

Utilizamos un generador de ruido con la opción de emisión de ruido rosa. Este tipo de ruido es característico porque su nivel tiene una densidad espectral inversamente proporcional a la frecuencia. Su nivel sonoro es constante en todas las bandas de octava y decae en 3 dB cada vez que doblamos la frecuencia. Se utiliza para analizar el comportamiento de salas, altavoces, equipos de sonido, etc, ya que su espectro resulta plano al utilizar filtros de octava o 1/3 de octava.



Fig 6.4 Generador de ruido

- Equipo de análisis:

Utilizamos como sistema de medida Symphonie. Este sistema se compone de un transductor (micrófono de condensador) conectado a una unidad de adquisición de datos de dos canales que transfiere, en tiempo real, la señal adquirida a un computador a través de una interfaz Pccard (PCMCIA). Así mismo el sistema cuenta con un software específico, en nuestro caso el utilizado ha sido dBBATI32, que añade la funcionalidad al equipo de poder analizar la señal capturada.

El micrófono conectado al sistema de medida corresponde al G.R.A.S 40AE: micrófono prepolarizado de campo libre de 1/2". Sensibilidad nominal: 50 mV/Pa referidos a -26 dB re 1 V/Pa \pm 2 dB. Capacidad: 14 pF (a 250 Hz). [16]

El preamplificador utilizado para este micrófono corresponde al G.R.A.S 26AC 1/2" CCP Standard Preamplifier.



Fig. 6.5 Analizador Symphonie



Fig. 6.6 Micrófono G.R.A.S 40AE

Operativa de medida:

La operativa de medida llevada a cabo en nuestro ensayo se ajusta a la establecida en la norma con la única variante de que, por restricciones de tiempo, hemos utilizado una única posición de fuente en el escenario, y hemos registrado sólo una curva de caída por posición. Además, cabe citar que, puesto que lo más interesante es saber la valoración del recinto en la posición de los oyentes, sólo se han realizado medidas a una altura (1,2 m.) que corresponde con la altura promedio de un espectador sentado en una butaca.

Hemos diseñado una malla de puntos que cubre toda la zona de audiencia que queremos estudiar, situando una posición de micrófono cada dos metros de distancia. Cubrimos todo el área con un total de 154 posiciones de micrófono distribuidas como indica la figura:

A	B	C	D	E	F	G	H
		150	151		152		
	149		Escenario			153	
PASILLO_1							PASILLO_2
	148		Fuente			154	
1	21	39	57	75	93	111	129
2	22	40	58	76	94	112	130
3	23	41	59	77	95	113	131
4	24	42	60	78	96	114	132
5	25	43	61	79	97	115	133
6	26	44	62	80	98	116	134
7	27	45	63	81	99	117	135
8	28	46	64	82	100	118	136
9	29	47	65	83	101	119	137
10	30	48	66	84	102	120	138
11	31	49	67	85	103	121	139
12	32	50	68	86	104	122	140
13	33	51	69	87	105	123	141
14	34	52	70	88	106	124	142
15	35	53	71	89	107	125	143
16	36	54	72	90	108	126	144
17	37	55	73	91	109	127	145
18	38	56	74	92	110	128	146
19							147
20							

Fig. 6.7 Esquema de posiciones de micrófono

Siguiendo el método del ruido interrumpido establecido por la norma para medir el tiempo de reverberación del recinto, excitamos el recinto con un ruido rosa producido por el generador de ruido descrito anteriormente y emitido por la fuente dodecaédrica. Activamos el ruido rosa durante un periodo de unos 10-15 segundos con el objetivo de alcanzar un estado estacionario y transcurrido este periodo de tiempo cortamos la fuente pero seguimos capturando la señal. De esta forma, se registra la caída de nivel que nos interesa para obtener el tiempo de reverberación del recinto. Esta configuración estaba diseñada de forma que la fuente emitía con un nivel inicial de unos 35-40 dBs por encima del ruido de fondo tal y como establece la norma. Repetimos este procedimiento para cada uno de los puntos descritos anteriormente.

Procesado:

Una vez realizadas las medidas y con los datos almacenados dimos por finalizado el ensayo y procedimos a su procesado. Gracias al software propio que nos proporciona Symphonie y una de sus herramientas, se calcula una recta que se ajusta a la caída de nivel, cuya pendiente indica la tasa de decrecimiento en dBs por segundo. Con esta herramienta obtenemos el valor del T60 medido en cada punto y para cada una de las frecuencias del espectro. Ayudándome de esta herramienta, comprobamos el ajuste automático de las rectas para cada frecuencia, en cada punto, y corrigiendo las que no estaban del todo bien ajustadas. Completado esta parte del procesado, exportamos los datos obtenidos del propio software que ofrece Symphonie a un fichero Excel con el fin de poder operar los datos con mayor versatilidad. El resultado es una hoja Excel donde se recogen los tiempos de reverberación para cada uno de los puntos medidos.

Cada medida realizada con Symphonie, donde se captura el nivel de presión sonora cada 100 ms, se visualiza un gráfico de la caída del nivel de presión sonora en función del tiempo. El software trata de ajustar una recta a esa caída mediante el método de mínimos cuadrados con el objetivo de estimar el T60 en ese punto (tiempo de reverberación definido como el tiempo que tarda en caer el SPL hasta 60 dB una vez cesa la emisión de la fuente). Posteriormente, se realiza una comprobación de que dicho ajuste automático se ha realizado de forma adecuada, y, en caso de comprobar algún ajuste erróneo, se procede a un ajuste visual de la recta (método permitido por la normativa). La Fig. 6.8 muestra una gráfica de la variación del T60 promedio en función de la frecuencia. Los valores se han calculado mediante un promedio aritmético de las posiciones de medida, tal y como indica la normativa vigente.

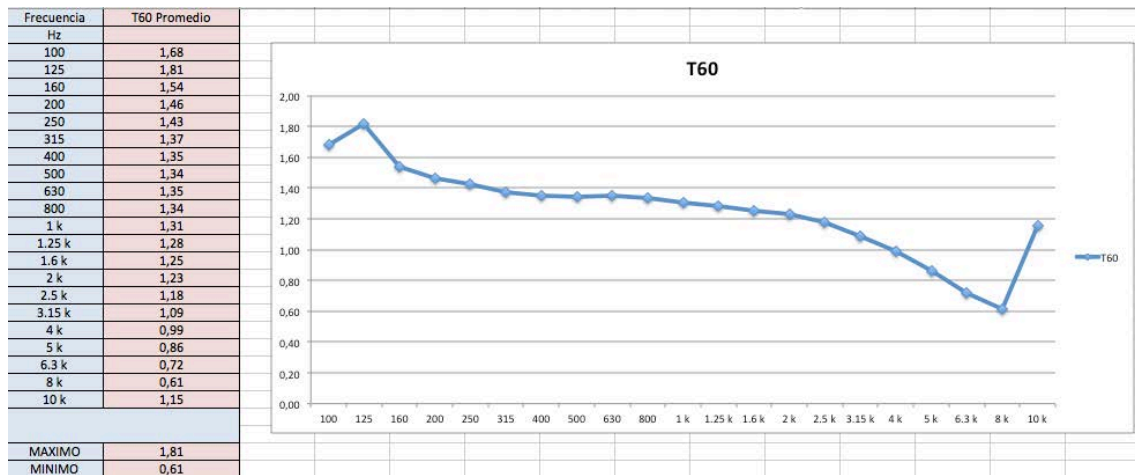


Fig. 6.8 Promediado T60 del recinto

6.2 Medidas de nivel de presión en el recinto:

El fin de la realización de este tipo de ensayo es recoger una muestra de nivel por cada uno de los puntos de un mallado diseñado para cubrir la zona de audiencia del recinto. Tanto, el nivel activo de la fuente como el nivel de ruido de fondo presente en el entorno

Instrumentación de medida:

Para la realización de este ensayo hemos utilizado la mayor parte de la instrumentación que en el caso anterior, salvo con la diferencia del analizador de señal. Utilizamos la misma fuente dodecaédrica con el amplificador de potencia, el mismo generador de ruido, pero utilizamos como analizador de señal un sonómetro portátil.

Cabe citar, que podría haberse utilizado el sistema de refuerzo sonoro del propio recinto. Sin embargo, en ese caso, no estaríamos considerando el ajuste del modelado acústico, y se estarían obviando los casos en los que se cuenta con una representación sin refuerzo electroacústico alguno.

- Sonómetro:

El sonómetro utilizado para el ensayo es el modelo 2250 de Brüel&Kjaer y es un sonómetro portátil. Sonómetro de Clase 1 que contiene un conjunto de funciones de programa e incluye: analizador frecuencial, registro y almacenamiento de datos, FFT, grabador de sonido, etc. Este modelo de sonómetro se compone de:

- Micrófono: Tipo 4189. Micrófono prepolarizado de campo libre de ½". Sensibilidad nominal: 50 mV/Pa referidos a -26 dB re 1 V/Pa \pm 1,5 dB. Capacidad: 14 pF (a 250 Hz). [15]



Fig. 6.9 Interfaz sonómetro portátil Fig. 6.10 Sonómetro portátil con pantalla anti-viento

Operativa de medida:

La operativa de medida para el registro de los niveles de presión ha consistido en la captura de niveles en cada uno de los puntos de la malla para cubrir toda la zona de la audiencia. Los puntos han sido los mismos que en el caso anterior, y con el fin de optimizar en tiempo y esfuerzo, se han realizado las dos medidas a la vez de manera que, mientras el analizador mide la caída de nivel, el sonómetro mide el nivel en un punto diferente, nivel con la fuente activa y posteriormente el ruido de fondo cuando esta dejaba de emitir. De esta forma se optimiza la corrección de las medidas por ruido de fondo, puesto que al hacer la medida de nivel con la fuente activa y la medida de ruido de fondo contigua (realmente en la misma medida, sin parar el registro de señal), se obtiene una estimación de gran calidad del ruido de fondo presente en la medida de nivel de señal con la fuente activa, lo cual es muy beneficioso en lo que a corrección por ruido de fondo se refiere. Cabe citar que el objetivo de la medida de ruido de fondo, además de para corregir el nivel de presión medido con la fuente activa (como se ha descrito anteriormente) también es contar con una estimación sobre el ruido de fondo presente en el local, la cual se puede incluir en el software, el cual lo utilizará como un factor a tener en cuenta en la determinación de los índices de inteligibilidad acústica.

Procesado:

Una vez teníamos los datos almacenados dimos por finalizado el ensayo, y posteriormente, procedimos a su procesado. Exportamos los datos registrados del propio software que contiene el sonómetro a hojas Excel, obteniendo un fichero Excel por cada punto de medida. Dentro de cada uno de los ficheros Excel figuraban varios registros que el sonómetro había capturado donde focalizamos los datos de interés para nuestro análisis. Dichos datos corresponden a los valores capturados por el sonómetro con una ponderación lineal (LZeq) para cada una de las frecuencias de interés (en bandas de tercio de octava) y en el espectro comprendido entre 100 Hz y 10kHz. Para cada medida, contamos con un valor medido correspondiente a la energía registrada durante 1 s. Una vez seleccionados los datos de interés, analizamos los que corresponden al valor activo de fuente separándolos del valor inactivo de fuente (ruido de fondo). Promediando

energéticamente los valores activos correspondientes a los segundos en los cuales la fuente dodecaédrica emitía, obtenemos un valor de nivel para cada frecuencia en la posición analizada. Y de la misma manera con los valores del nivel de ruido de fondo, seleccionando los valores registrados correspondientes a los segundos en los que la fuente está apagada y se ha extinguido el nivel correspondiente a la reverberación en la posición analizada, realizando un promediado obtenemos un valor de nivel de ruido de fondo para cada posición medida.

Con los datos ya procesados podemos pintar mapas de distribución del nivel de presión para la zona de audiencia medida, tanto para la situación con la fuente encendida como con ella apagada (ruido de fondo).

Mapa de nivel de presión sonora			Frecuencia: 1kHz											
A	B	C	D	E	F	G	H							
		79,9	80,1		79,7									
	79,5		Escenario				80,5							
PASILLO_1								PASILLO_2						
	81,6		FUENTE				79,5							
1	76,0	77,3	78,3	80,0	79,2	78,2	77,7	76,6	escaleras	Valor Máxim	81,6			Codigo colores
2	75,5	77,4	78,3	78,2	77,4	77,5	76,2	75,6		Valor Minim	65,5			79-82
3	73,9	75,6	76,3	77,0	76,2	74,2	76,1	75,5						77-79
4	75,4	75,2	76,3	75,2	75,9	75,6	74,5	73,2						74-77
5	75,3	73,9	75,0	75,1	74,2	74,1	73,2	73,6						71-74
6	74,9	72,0	72,6	73,5	72,0	73,8	72,6	72,3						68-71
7	71,8	72,4	73,6	71,8	71,6	72,6	72,4	72,0						65-68
8	72,5	72,5	72,3	71,8	72,5	73,3	72,4	71,8						
9	70,9	71,8	72,2	70,9	72,1	72,9	71,5	72,3						
10	70,4	71,1	72,7	71,6	71,8	72,2	71,3	71,9						
11	70,1	70,3	70,0	69,8	70,2	70,5	70,1	69,0						
12	70,0	69,1	68,4	68,7	69,1	69,4	68,7	69,7						
13	68,9	67,6	68,2	68,0	68,4	68,8	68,5	68,4						
14	67,7	67,8	66,3	67,9	66,9	68,3	68,3	67,4						
15	68,3	68,0	67,1	67,7	66,3	67,0	66,6	66,7						
16	66,9	66,6	65,5	67,2	66,3	66,8	66,4	68,2						
17	68,2	67,0	67,0	66,9	67,0	66,5	66,7	66,5						
18	66,6	66,9	67,2	67,2	66,4	66,6	66,2	66,5						
19	66,6							67,0						
20	67,2													

Fig 6.11 SPL medido (tercio de octava de 1 kHz)

6.3 “Modus operandi” del ensayo:

Previo al Ensayo:

- Preparativos

Para llevar a cabo el ensayo tuve que realizar unos pasos previos. En primer lugar administrativos, el recinto a ensayar pertenece al patrimonio del municipio de Sonseca (Toledo) y aunque la administración del ayuntamiento está en conocimiento del proyecto realizado en el auditorio y contar con el permiso, tuve que acordar un día con el personal responsable. Para ello acordamos el 23 de Julio ya que el recinto estaría sin actividades a partir de las 2 de la tarde requisito indispensable para la realización del ensayo. Formalicé el acuerdo mediante una solicitud en la administración del ayuntamiento y me concedieron el permiso.

Este acuerdo se lo transmití a mi tutor del TFG D. Luis Azpicueta, el cual se iba a desplazar conmigo al recinto para principalmente supervisar el ensayo y me iba a proporcionar el material necesario para este fin. Además, contamos con la colaboración de Javier Lopez Labraca, alumno y compañero del Grado en Ingeniería de Sistemas Audiovisuales que accedió gustosamente a mi petición de colaboración en el ensayo.

Antes del día del ensayo, realizamos el estudio previo del recinto y de las medidas que íbamos a realizar. Este proceso, se compuso de:

- Estudio de la normativa vigente para la medición de parámetros acústicos en recintos.
- Recopilación de la instrumentación acústica necesaria para tal efecto, así como herramientas o utensilios necesarios el día del ensayo.
- Diseño de un esquema de la superficie de audiencia con la situación de todos los puntos que íbamos a medir.
- Diseño de un esquema para la fácil identificación de cada punto medido, con su situación en el mapa y su ID en el software de medida.

- Operativa:

Al disponer de un micrófono conectado al analizador Symphonie y por otro lado un sonómetro portátil, decidimos proceder de forma que situamos los dos trípodes (uno para el analizador Symphonie y otro para el sonómetro portátil) en puntos contiguos. Realizamos una medida de 20 segundos, en la cual, activábamos la fuente, pasados unos 3-4 segundos comenzamos la medida, y en torno a los 10-15 segundos de medida desactivábamos la fuente. Con este procedimiento cada sonómetro recogía los datos que comentamos anteriormente: Symphonie capturaba las caídas de nivel en el tiempo, mientras que el sonómetro portátil recogía los niveles de actividad y no actividad de la fuente. Una vez completados los 20 segundos, cambiamos de posición ambos trípodes y procedíamos a dos nuevas medidas. Repetimos este procedimiento hasta completar los 154 puntos de medida.

Al estar formado el equipo de media por tres personas, nos organizamos de manera que, la persona 1 era la encargada de colocarse en el ordenador para activar la medida con Symphonie y comprobar cuando esta finalizase que los valores obtenidos eran coherentes. Además era la encargada de indicar a la persona 2 (responsable de la activación de la fuente), cuando debía encenderla y apagarla. La persona 2 era la encargada de la activación y desactivación de la fuente. Por último, la persona 3, era la encargada de desplazar el micrófono del analizador Symphonie y el sonómetro portátil a las posiciones marcadas, activar la medida en el sonómetro portátil y almacenar la misma si sus datos se consideraban válidos. Este modo de operación se pensó con el fin de optimizar el tiempo del que disponíamos para la medida, ya que, al ser un recinto de grandes dimensiones, no podíamos perder mucho tiempo en los desplazamientos para medidas contiguas.

Con el objetivo de estar lo mejor preparados posibles para el día del ensayo real, realizamos varias pruebas con medidas del mismo tipo en el laboratorio de la universidad y así familiarizarnos con la instrumentación.

23 Julio 2014 Día del ensayo:

Una vez en el recinto, los tres componentes del equipo de medida inspeccionamos la zona de ensayo y reconocimos los puntos de interés “in situ”.

En este punto, nos surgió un inconveniente, la zona de audiencia, estaba ocupada por algunas torres de sillas de plástico. Estas sillas, no estaban contempladas en nuestro modelo, por lo que tuvimos que retirarlas colocándolas en lugares que no afectaran desde el punto de vista acústico a nuestro ensayo.

Una vez estaba la zona a ensayar libre, se procede a la interconexión y configuración del equipo de media: Situamos la fuente dodecaédrica en la parte delantera y centrada del escenario. La conexión a la etapa de potencia y ésta a su vez al generador de ruido.



Fig. 6.12 Conexión del generador de ruido, etapa de potencia y fuente omnidireccional

Marcamos los puntos de comienzo de cada hilera de medida con cinta adhesiva en el suelo para identificar fácilmente las posiciones de medida. Colocamos una mesa con el ordenador al que estaba conectado Symphonie, una colocación un tanto estratégica ya que estábamos limitados por las longitudes de cable y al ser un recinto de grandes dimensiones debíamos evitar mover la mesa con el ordenador en la medida de lo posible.

Una vez estaba todo montado, comprobamos la calibración de la instrumentación mediante un calibrador sonoro y comenzamos el ensayo. Nos colocamos cada uno en nuestro puesto y el protocolo era el siguiente:

- Encender la fuente
- Al cabo de 3-4 segundos de estabilización, comenzaba el registro del sonómetro portátil y el analizador Shymphonie.
- Tras 10-15 segundos de registro, se desactivaba la fuente.

- Una vez finalizados los 20 segundos de medida, se comprueban rápidamente los resultados, y si todo se considera válido se pasa al siguiente punto.
- Se repite el mismo procedimiento para cada uno de los 154 puntos de medida considerados.



Fig. 6.13 Vista 1 Ensayo



Fig. 6.14 Vista 2 Ensayo



Fig. 6.15 Vista 3 Ensayo

Realizamos la mitad de las medidas en unas 2 horas, una vez llegados a este punto, paramos el ensayo y recolocamos la mesa con el ordenador para suplir las restricciones por longitudes de cable y cubrir la mitad restante del patio. Comenzamos de nuevo la operativa hasta que tuvimos todos los puntos medidos.

Una vez cubiertos todos los puntos, nos aseguramos del almacenamiento de los datos registrados, comprobamos de nuevo la calibración de la instrumentación verificando que no se habían dado variaciones de la sensibilidad del equipo de medida y dimos por finalizado el ensayo.

En los días posteriores, realizamos una última medida del nivel de presión de la fuente dodecaédrica a un metro de la fuente y en campo libre. Dicha medida la realizamos en la cámara anecoica de la universidad, con la misma configuración de fuente, etapa de potencia y generador de ruido que el día del ensayo. Estas últimas medidas son necesarias para poder configurar la fuente que se insertará en el modelo virtual generado mediante el software de simulación. De esta forma, el emisor configurado tendrá las mismas características de radiación que la fuente sonora utilizada en las medidas: patrón direccional omnidireccional y respuesta en frecuencia dada por las medidas realizadas a 1 m de distancia y en campo libre.



Fig. 6.16 Medida en Cámara Anecoica

Una vez recogidos todos los datos se tiene un valor de nivel de presión y un valor de la caída del nivel por cada punto medido. De cara a un análisis profundo estos datos son poco robustos ya que deberíamos de haber tomado varias repeticiones en cada punto. Como he comentado con anterioridad, se tomó como decisión dar prioridad a cubrir todo el recinto de puntos y poder obtener unas conclusiones generales, en vez de centrarnos en una única parte debido a las restricciones temporales impuestas. Es decir, preferimos obtener muchas medidas con una incertidumbre más elevada, que pocas medidas con incertidumbre más reducida.

El Anexo 1 muestra los resultados obtenidos del ensayo, aportando los mapas de nivel de presión obtenidos para algunas de las frecuencias de interés.

7. Ajuste del modelo

EASE, como hemos comentado en el capítulo de simulación del modelo, nos ofrece una serie de herramientas para el estudio acústico de nuestro diseño, herramientas para cálculo de tiempo de reverberación y su optimización, mapeado, visualización de primeras reflexiones, herramientas estadísticas, etc.

El problema surge para simulaciones de recintos que ya están contruidos. Cuando diseñamos en el software de simulación dichos recintos, completamos su lista de materiales a través de información proporcionada por el arquitecto, comprobaciones in situ, etc. De forma que obtenemos una visión general de los materiales de los que se componen las superficies, otorgando al software EASE unos datos generalizados.

Esta generalización, puede provocar un distanciamiento en el comportamiento entre el modelo simulado y el modelo real. Por mucha que sea la precisión de los cálculos realizados, no obtendremos unos resultados fiables a menos que ambos modelos, real y simulado, tengan el mismo comportamiento. Por ello, y persiguiendo nuestro fin, tenemos que proceder al ajuste del modelo simulado.

Una forma de llevar a cabo el ajuste del modelo consiste en utilizar el tiempo de reverberación del recinto. Para ello, se mide dicho parámetro en el recinto real y se modifican los coeficientes de absorción de los materiales hasta conseguir los mismos resultados.

Otra manera de realizar el ajuste consiste en el análisis del nivel de presión sonora en diferentes puntos. Medir en el recinto real la distribución del nivel de presión sonora (SPL) y conseguir en el modelo simulado los mismos valores. Para ello, se toman medidas de nivel equivalente en función de la frecuencia (L_{req}) en diferentes puntos del recinto y debemos conseguir, mediante el ajuste, obtener el nivel medido en el mismo punto de nuestro modelo simulado.

El nivel que capturamos en el ensayo, se compone de la suma del nivel directo de la fuente más el nivel reverberante, procedente de las reflexiones. La zona de campo reverberante es aquella donde predomina el sonido reflejado y comienza una vez superada la distancia crítica (D_c), límite donde coinciden los valores del nivel del campo sonoro directo y reverberante.

En nuestro caso, en el ensayo in situ, tomamos tanto medidas de nivel como medidas de T_{60} para la malla de puntos diseñada. Apoyándonos en estos valores medidos, podemos utilizar ambos para el ajuste del modelo. Destacar, que debido a las restricciones de acceso a nuestro recinto, solo se pudo tomar una medida por punto de la malla diseñada. Por ello, tenemos que considerar los resultados de las medidas poco robustos (es decir, con una cierta incertidumbre) y puede que nos influyan de cara a la precisión de nuestro ajuste.

Sin embargo, las medidas de T_{60} realizadas según el método de ruido interrumpido y con sólo una repetición de la medida por punto y el posterior ajuste a la curva generan una incertidumbre de medida mayor que la atribuible a la

medida de nivel de presión sonora, puesto que ésta última incluye el promedio temporal de la energía acústica en diferentes instantes temporales

Por estas restricciones y analizando la fiabilidad y precisión de los resultados del ensayo, hemos considerado el segundo método de ajuste, ajuste por niveles de presión sonora.

Actualmente no existe ninguna metodología para la realización de este tipo de ajustes. La forma de proceder habitual suele basarse en suposiciones y en la realización de múltiples iteraciones utilizando el método de ensayo-error. Algunas de las consideraciones que debemos de tener en cuenta antes de empezar con el ajuste son:

- Al tratarse de una aproximación, debemos de considerar el mayor número de puntos de análisis posibles.
- Tener en cuenta que el campo sonoro no es totalmente difuso. Podemos modificar el coeficiente de difusión de los materiales y dichos materiales no se distribuyen por igual.
- Considerar puntos cercanos a materiales y así poder realizar modificaciones en su coeficiente de absorción y difusión (scattering) en función de los valores obtenidos.
- En nuestro caso tenemos un factor muy importante a considerar, la superficie correspondiente al cielo con coeficiente de absorción 1. Es la superficie más grande del recinto, y por tanto la que más afecta a todos los puntos, y no podemos modificar su valor.

Como objetivo tenemos que conseguir una solución de compromiso entre los puntos que hemos medido y los puntos simulados en el modelo. De esta forma obtener como resultado un análisis detallado y completar el diseño del modelo con su comportamiento real.

Tomaremos como valores objetivo los valores obtenidos en el ensayo, valores de nivel equivalente (L_{zeq}), el proceso ensayado para el ajuste ha consistido en:

- Estudio inicial del modelo simulado respecto a los valores objetivo.
- Propuesta de ajuste pertinente para mejorar el compromiso entre valores simulados y objetivos.
- Repetición del paso anterior hasta la consecución de unos resultados óptimos.

Se establece como criterio de ajuste del modelo un compromiso de variación de 6 dBs respecto del valor medido en el ensayo. Se impone este valor teniendo en cuenta las incertidumbres del proceso de medida y el posible error cometido por EASE en la simulación de los valores de nivel de presión en las posiciones establecidas.

Una vez ajustado nuestro modelo, podremos seguir optimizando el ajuste utilizando otras herramientas del software como el trazado de rayos, parámetros de Claridad, definición, etc. Herramientas que nos ayudarán a la consecución de un modelo mas robusto y representativo de la realidad.

En primer lugar, presentamos el modelo inicial. Este modelo se ha diseñado con los materiales indicados en los planos de construcción y se han utilizado los materiales estándar que ofrece EASE en su base de datos para el modelo simulado.

Dentro del modelo inicial, se sitúa una fuente sonora en el mismo punto donde se situó la fuente el día del ensayo (Fig. 7.1 (1)). La fuente simulada tiene que poseer las mismas características que la fuente utilizada en el ensayo, para ello, se establecen sus parámetros dentro de la configuración de fuente en el software. Se establece su patrón de directividad omnidireccional (Fig. 7.1 (3)) y los valores de nivel de presión medidos a la distancia de 1 m de la fuente en la cámara anecoica (Fig. 7.1 (2)). Podemos ver la configuración de la fuente en Fig. 7.1.

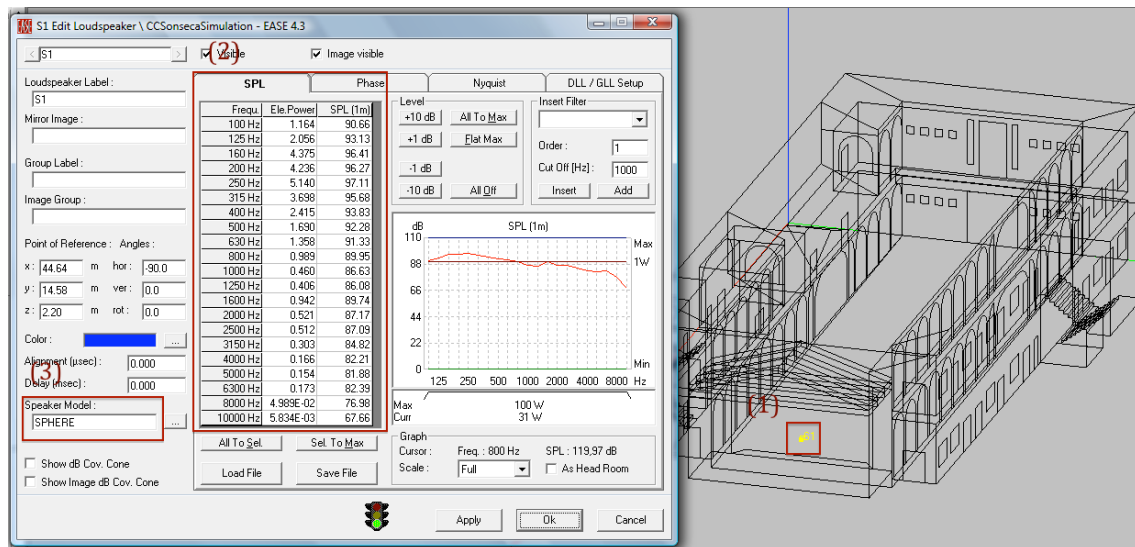


Fig. 7.1 Configuración de la fuente

La distribución de los puntos de análisis que hemos realizado ha sido la siguiente:

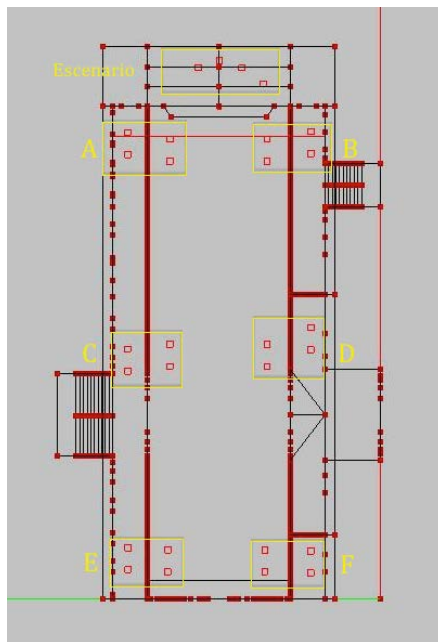


Fig. 7.2 Puntos de análisis

		Silla26			
	Silla25		Silla27		
		Escenario		Silla28	
PASILLO_1					PASILLO_2
		FUENTE			
Silla1	Silla2			Silla5	Silla6
Silla3	Silla4			Silla7	Silla8
Silla9	Silla10			Silla13	Silla14
Silla11	Silla12			Silla15	Silla16
	Silla18			Silla21	
	Silla20			Silla23	Silla22
Silla17					Silla24
Silla19					

Fig. 7.3 Esquemático de puntos de análisis

A continuación se mostrarán las gráficas para cada una de las zonas analizadas donde se dibuja la diferencia entre el Nivel Medido en el ensayo y el nivel simulado por EASE, expresada en dBs. [13]

Modelo inicial:

Zona A

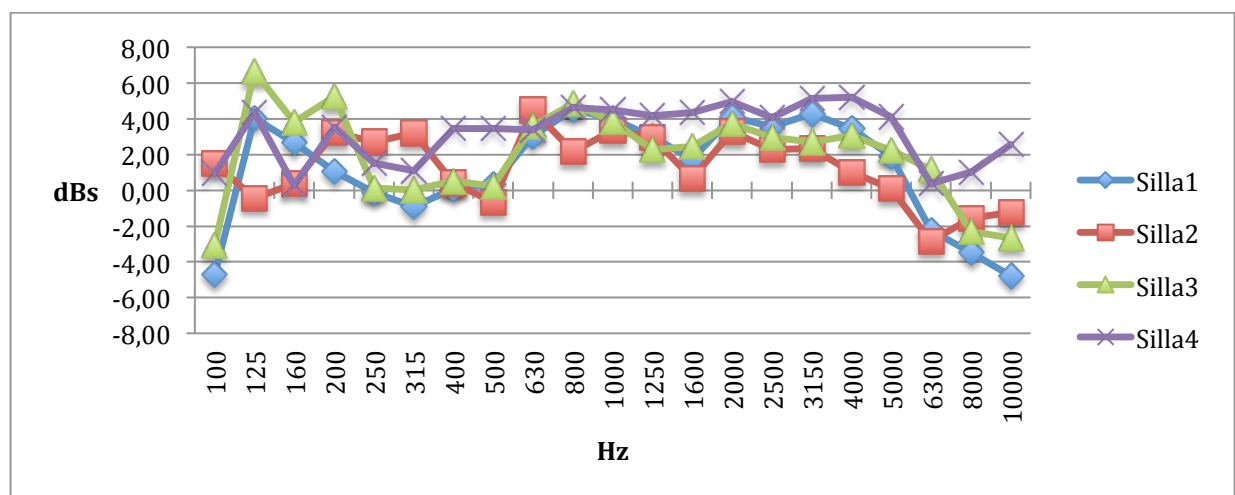


Fig. 7.4 Modelo inicial. Diferencia de niveles (Nivel medido – Nivel simulado)

Zona B

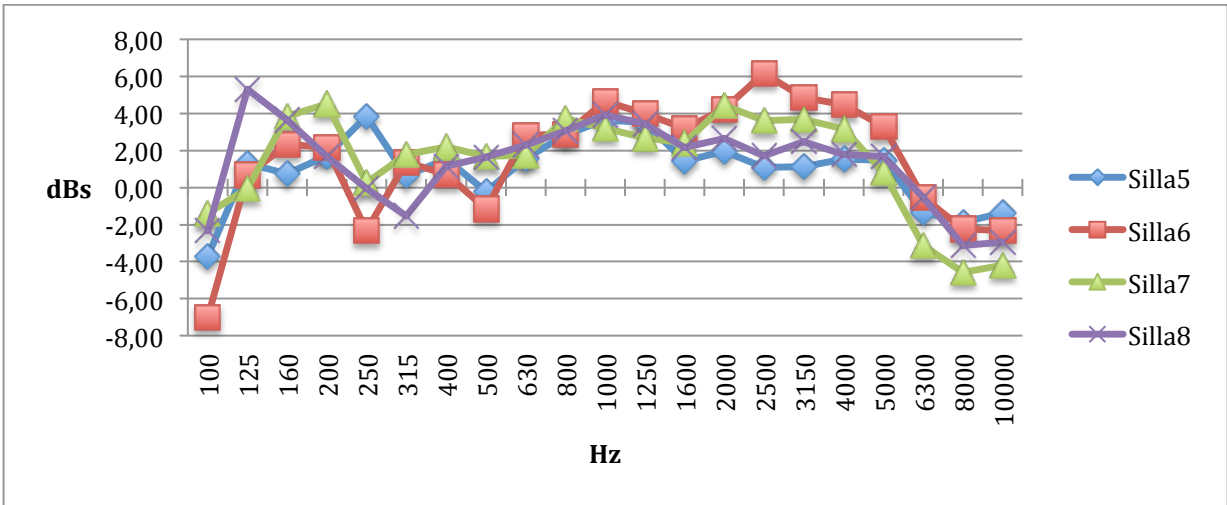


Fig. 7.5 Modelo inicial. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona C

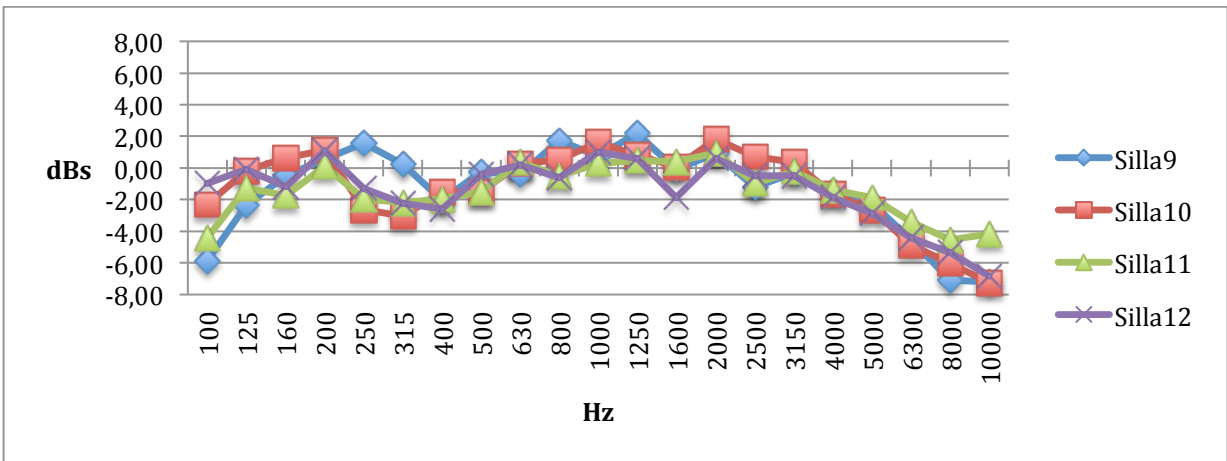


Fig. 7.6 Modelo inicial. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona D

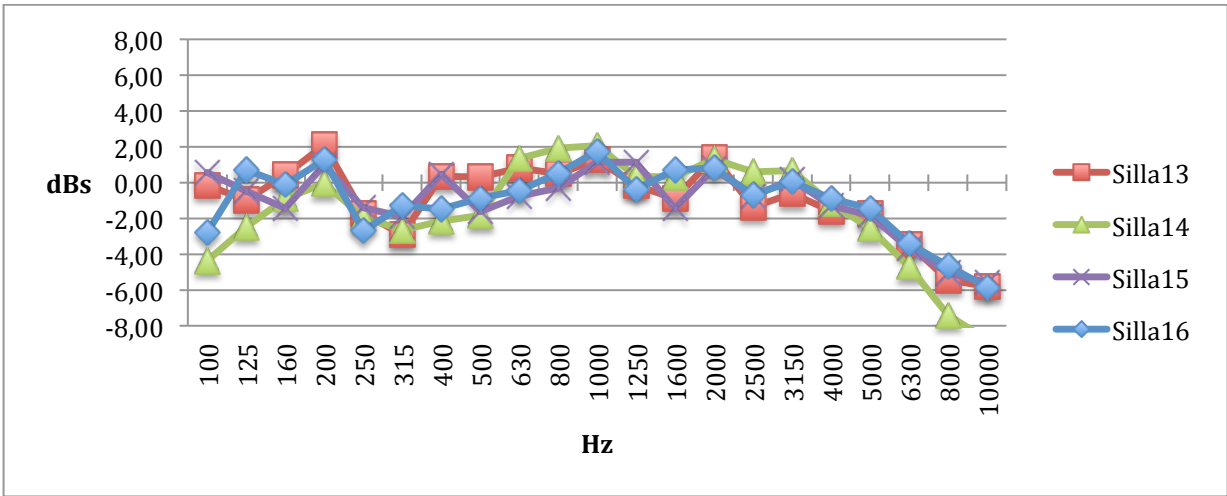


Fig. 7.7 Modelo inicial. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona E

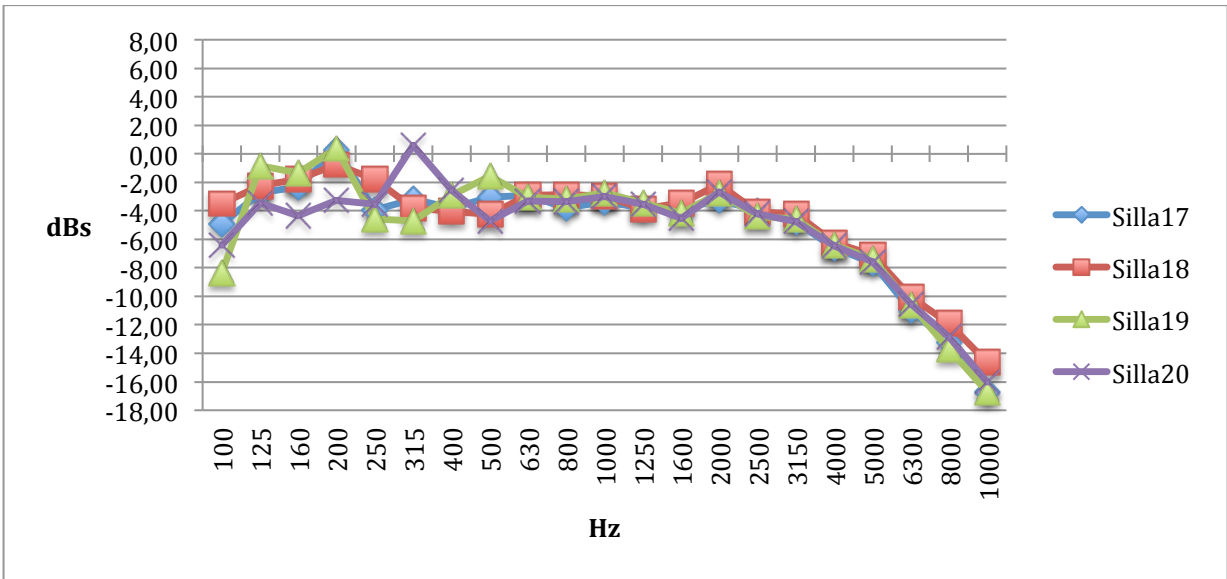


Fig. 7.8 Modelo inicial. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona F

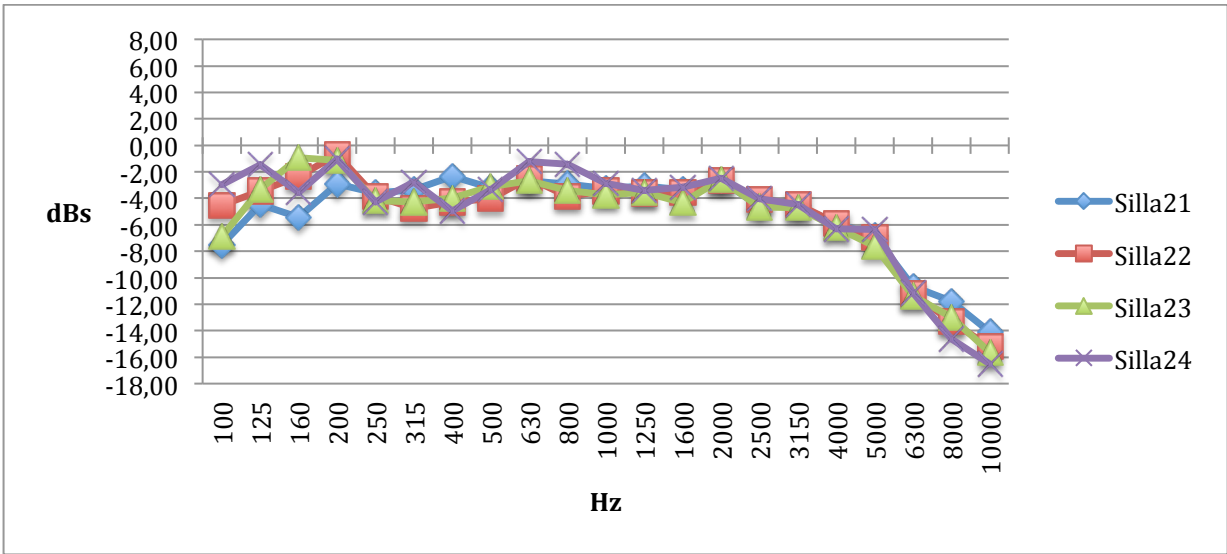


Fig. 7.9 Modelo inicial. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Escenario

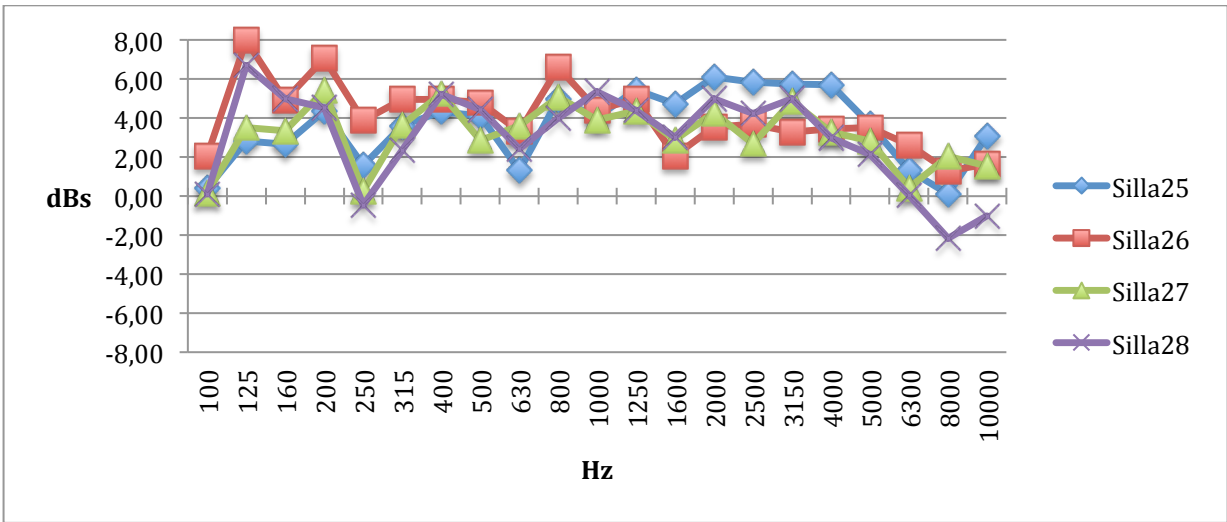


Fig. 7.10 Modelo inicial. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

La elección de los puntos en esta zonificación se ha hecho con el fin de conseguir analizar las partes más conflictivas del modelo, tomando para ello puntos cercanos a las paredes, en los corredores laterales y en el patio cercanos a la fachada arqueada. La idea de tomar cuatro puntos cercanos se ha hecho con el objetivo de la comparativa entre los mismos al tener solo una medida real en cada uno de ellos. De esta forma, si obtuviéramos valores muy diferentes a los reales en la simulación podríamos comparar con puntos cercanos e identificar el valor que causa la incertidumbre.

Analizando las graficas obtenidas en primera instancia, podemos afirmar, en términos generales que:

- En las zonas A y B los valores en la parte central del espectro de frecuencias varían unos 4 dBs respecto de las medidas tomadas, pero siguen una línea aproximadamente similar en ambas zonas al ser posiciones simétricas respecto de la fuente. Además podemos observar el comportamiento para frecuencias a partir de 5 kHz donde los valores de la simulación superan los valores medidos y se produce una diferencia negativa. Esto nos indica que la caída de nivel se produce de manera más rápida en el edificio real que la simulada por EASE.
- En las zonas C y D obtenemos unos resultados considerablemente buenos para el rango de frecuencias central ya que tenemos una variación de nivel de 2 dBs entre 125 Hz y 4 kHz. Al igual que nos ocurría en el caso anterior a partir de 4 KHz la gráfica comienza a caer de una manera pronunciada lo que nos indica que se produce una mayor diferencia entre los valores simulados y medidos para estas frecuencias y deberemos ajustar en estos valores frecuenciales.
- En las zonas E y F conseguimos unos resultados negativos que nos indican que todos los valores simulados son mayores que los resultados medidos en el ensayo. De igual manera que en los casos anteriores, a medida que aumentamos en frecuencia aumenta la diferencia entre los valores simulados y medidos.
- En la zona del escenario obtenemos unos valores simulados un poco por debajo de los medidos con algún valor sobrepasando el margen permitido pero que se ajustan dentro de lo deseado. Es importante destacar que la gráfica podría considerarse constante con la misma diferencia de nivel hasta 5 kHz reduciéndose a partir de este valor la diferencia entre los valores medidos y simulados.

Los materiales más susceptibles de provocar estos niveles, por ocupar la mayor parte del recinto y estar situados próximos a los puntos de análisis son:

- UNGLAZED BRICK: Pared de ladrillo de era.
- PAINTED BRICK: Pared de ladrillo pintado, pared arqueada.
- TILE, FLOOR: suelo de baldosa cerámica, pasillos.
- TERRAZZO: suelo de terrazo, patio de audiencia.

Ajuste 1:

En este primer ajuste nos hemos basado principalmente en el ensayo de prueba y error modificando los parámetros de absorción de los materiales que hemos comentado anteriormente ya que creemos que afectan directamente a las posiciones analizadas por dos motivos principales. El primero porque son los materiales con mayor superficie de entre todos los que componen el recinto y el segundo por su proximidad a las posiciones analizadas.

Los cuatro materiales modificados afectan directamente a los puntos de análisis, los materiales UNGLAZED BRICK y PAINTED BRICK cubren las superficies verticales más próximas a los puntos de análisis. Los materiales TILE, FLOOR y TERRAZZO cubren los suelos sobre los que se apoyan los puntos de análisis.

Observando la distribución creciente del coeficiente de absorción en el rango frecuencial, decidimos aumentar el valor de absorción a partir de 2 kHz. El objetivo perseguido con esta modificación es aumentar la absorción y disminuir el nivel de los valores simulados en este rango de frecuencias, reduciendo la diferencia entre los valores medidos y simulados.

Las gráficas siguientes muestran la modificación del coeficiente de absorción de los materiales nombrados anteriormente.

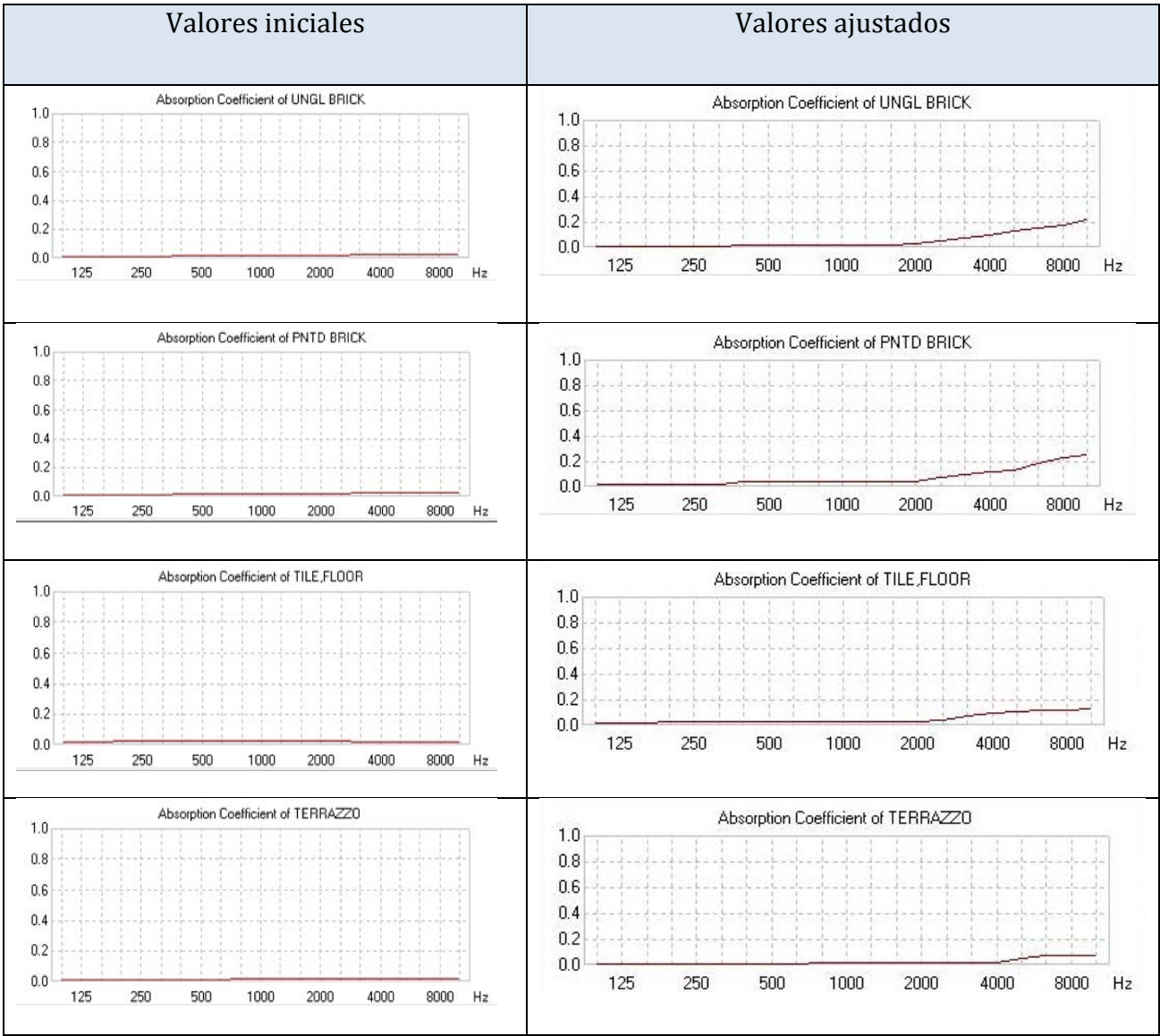


Tabla 7.1 Valores iniciales y ajustados de los materiales

Ajuste 2:

Este ajuste se centra principalmente en las posiciones que se encuentran en la zona del escenario. En el primer resultado obtenido para estas posiciones podemos observar que los valores a partir de 160 Hz hasta 5 kHz siguen una línea aproximadamente recta con variaciones entorno a los 2 dBs, pero separados de los valores medidos unos 4 dBs. En bajas frecuencias por debajo de 125 Hz y en altas, por encima de los 5 kHz los valores medidos y simulados se aproximan con diferencias aproximadas de 2 dB.

Analizando este resultado vamos a intentar con este ajuste que los valores simulados aumenten su nivel y se reduzca su distancia con los valores medidos. Para ello, decidimos disminuir la absorción de los materiales suelo, compuesto por tarima de parquet (PARQT CON), el material que recubre el tejado por la parte interior, láminas de madera que hemos simulado con WOOD GRID 1 y por último reducir en la parte central del espectro de frecuencias el valor de absorción del material tela Trevira (DRAPE MED).

Con la disminución del coeficiente de absorción de estos materiales, intentamos aumentar el número de reflexiones en estas superficies para, con ello, provocar una mayor densidad de rayos que llegan a los puntos analizados y aumentar el nivel simulado.

Analizaremos este resultado, pero debemos tener en cuenta que los materiales modificados afectan en gran medida a los puntos analizados ya que son los que delimitan el escenario, pero existe una gran diferencia en tamaño respecto de los materiales modificados anteriormente, por lo que tampoco debemos esperar unos resultados muy llamativos.

Los resultados obtenidos con el ajuste 1 y 2 son:

Zona A

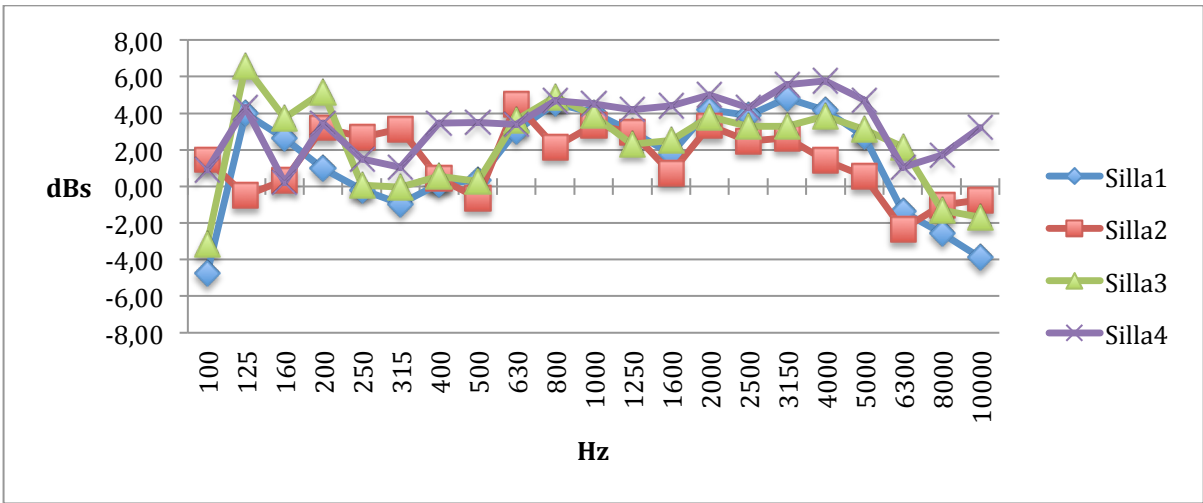


Fig. 7.11 Ajuste 1. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona B

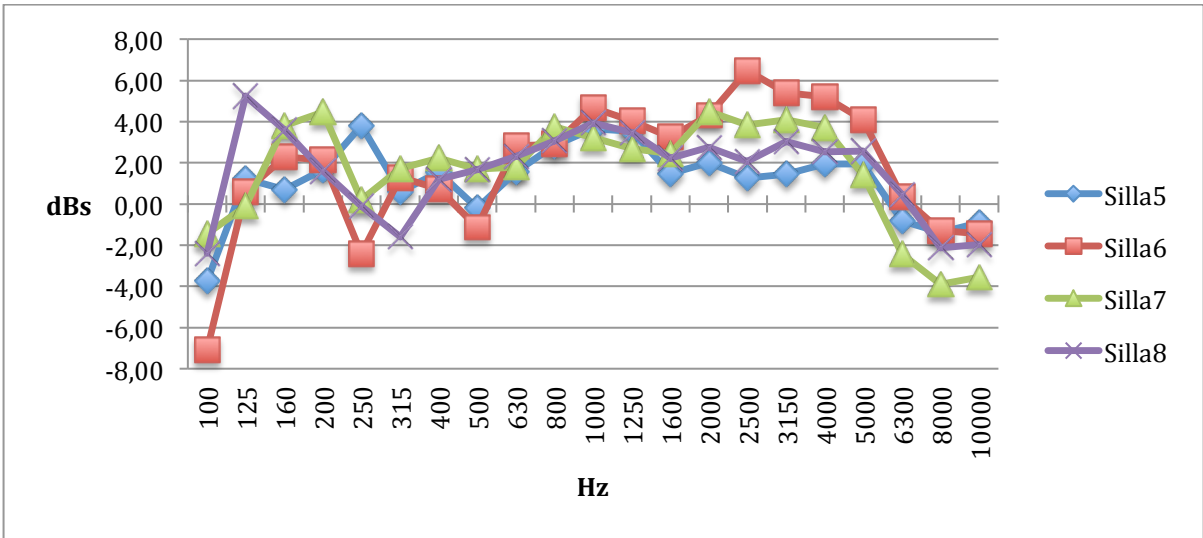


Fig. 7.12 Ajuste 1. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona C

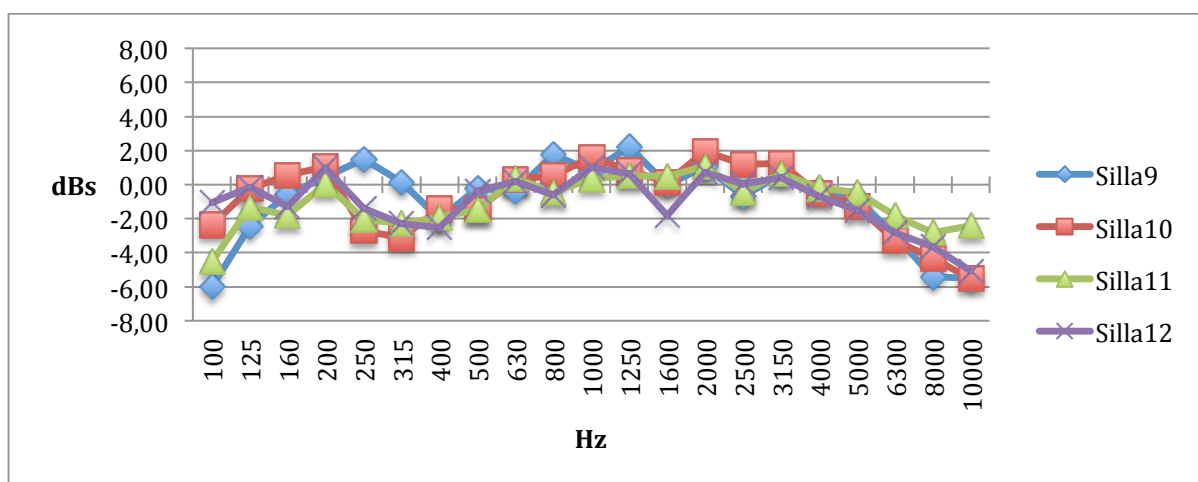


Fig. 7.13 Ajuste 1. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona D

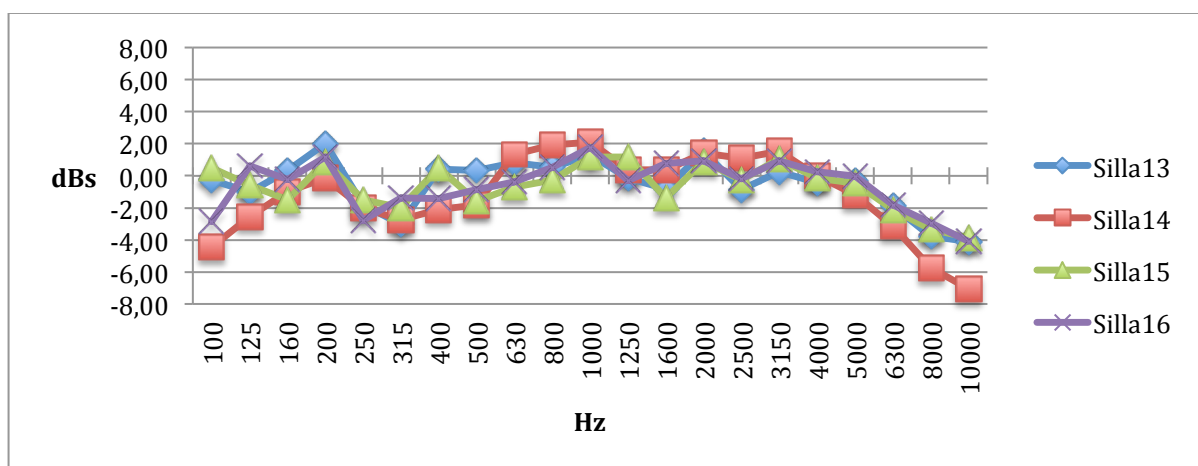


Fig. 7.14 Ajuste 1. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona E

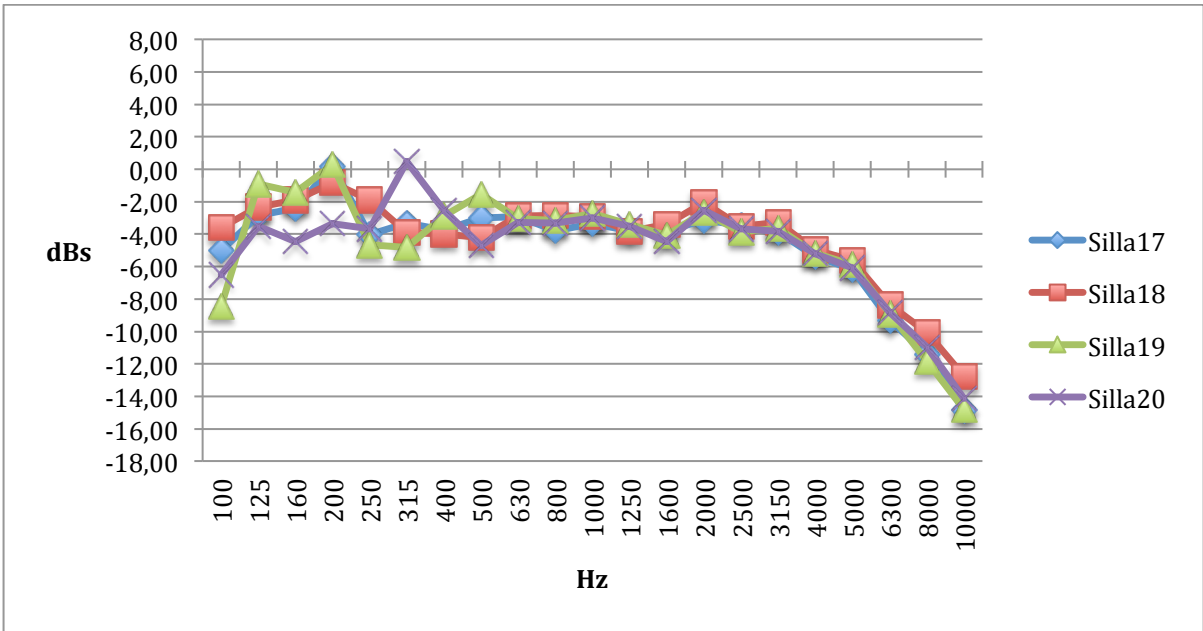


Fig. 7.15 Ajuste 1. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona F

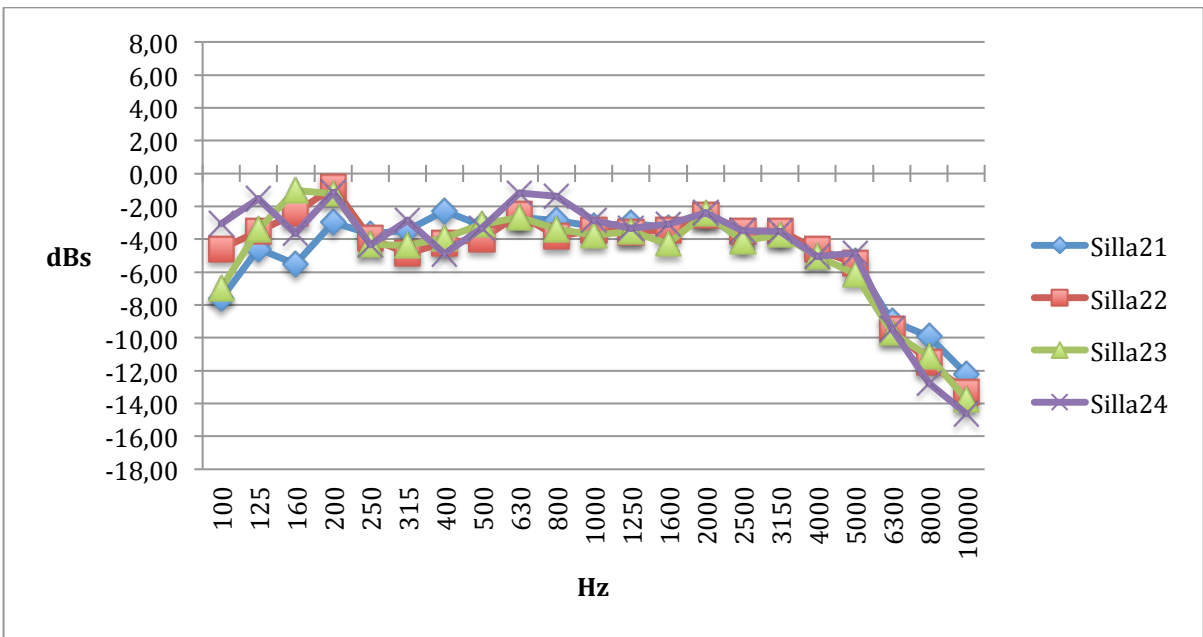


Fig. 7.16 Ajuste 1. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Escenario

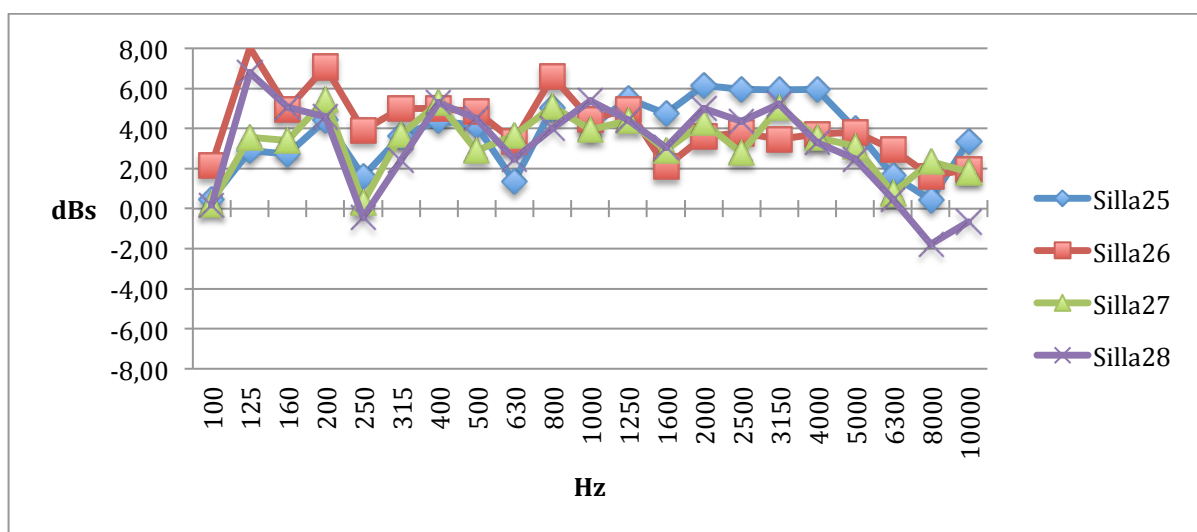


Fig. 7.17 Ajuste 1. Diferencia de niveles (Nivel medido – Nivel simulado)

Evaluación de los ajustes realizados:

Analizando los resultados obtenidos de los ajustes realizamos podemos observar que las modificaciones realizadas en los materiales de las paredes y suelos del patio han realizado el efecto perseguido.

En las gráficas A y B podemos ver cómo para frecuencias por encima de 5 kHz se ha disminuido la diferencia entre los valores medidos y simulados. Concretamente si nos situamos en las sillas 1, 3 de la zona A o 6, 8 de la zona B vemos cómo disminuye la diferencia de nivel alrededor de 1 dB. Es importante destacar que estas sillas se encuentran en los pasillos y por ello están afectadas directamente y por cada uno de sus perfiles por los materiales que hemos modificado, es por ello que se ha reducido su nivel en bajas frecuencias reduciéndose su diferencia con el nivel medido. Las sillas 2, 4, 7, 9 han sufrido el mismo efecto pero menos pronunciado ya que se encuentran situadas en el patio y no están tan afectadas directamente como sus parejas situadas en los pasillos. Los resultados obtenidos siguen la línea dentro del criterio de ajuste establecido.

Si observamos las graficas de las zonas C y D podemos observar el mismo efecto que en las zonas A y B pero con una mayor pronunciación. En este caso las dos zonas sufren una reducción de nivel simulado de entorno a los 2 dBs por encima de 5 kHz y con ello reducen sus diferencias con el nivel medido. Con esta reducción se incluyen todos los valores del espectro dentro del rango de incertidumbre admitido. Podemos observar también cómo la caída de nivel en altas frecuencias sigue produciéndose en el ensayo real de forma más rápida que en el modelo simulado, como ya ocurría en el modelo sin los ajustes. Los valores para frecuencias en la parte central del espectro se sitúan muy cercanas a los valores medidos con valores de 2 dBs de diferencia respecto al ensayo real.

En cuanto a las zonas E y F podemos observar que las frecuencias centrales del espectro hasta los 5 kHz y con alguna excepción por debajo de los 125 Hz cumplen el criterio. Pero el ajuste ha realizado un efecto muy leve o casi inexistente incluso en las sillas colocadas en los pasillos. Este resultado nos conduce a pensar en varias opciones, en primer lugar debemos tener presente en todo momento que solo hemos realizado una sola medida por cada punto debido a las restricciones de acceso al recinto, por lo que podemos pensar que tenemos poca información o poco robusta para el análisis de estos puntos conflictivos. Por otro lado, podemos pensar en los factores que afectan a la propagación del sonido en el aire ya que éstas son las posiciones más alejadas respecto de la fuente y la onda tiene que recorrer la mayor distancia por lo que las condiciones meteorológicas afectan en mayor medida. Por ello, son las posiciones que más influenciadas están por las incertidumbres provocadas por los factores atmosféricos y dicha afección es más acentuada para alta frecuencia. Sería muy interesante como trabajos futuros sobre este estudio, el análisis del propio recinto en condiciones atmosféricas diferentes y la toma de varias medidas en un mismo punto centrándose en las posiciones finales.

En nuestro caso, vamos a considerar estas variaciones fuera del rango permitido para las frecuencias superiores a 5 kHz como valores fuera de nuestro análisis ya que debido a las restricciones comentadas no disponemos del material suficiente para su análisis específico.

Por último, analizamos la gráfica correspondiente al ajuste en el escenario. Podemos ver que los valores medidos están unos 4 dBs por encima de los valores simulados disminuyendo esta diferencia para frecuencias mayores de 5 kHz. Si comparamos con la grafica obtenida antes del ajuste no se observan apenas diferencias. Este suceso nos lleva a pensar como comentamos con anterioridad que los materiales modificados no tienen una superficie suficiente como para variar los valores de nivel en los puntos analizados significativamente.

Por otro lado, destacar que, el día del ensayo, en el escenario se situaba una plataforma provisional con forma escalonada construida con materiales de aluminio y madera. Dicha plataforma modifica las condiciones de difusión y estaba situada entre la pared cubierta por la tela Trevira y los puntos de análisis. Este factor, que no está contemplado en el modelo ya que no disponíamos de los datos suficientes para su construcción, puede influir con el aumento del nivel recogido el día del ensayo y provocar la diferencia con el nivel simulado ya que no está incluido dicho elemento en la simulación.

Ajustes finales:

Con el análisis de los resultados anteriores ajustes 1 y 2 hemos intentado mejorar aun más los resultados aunque estos ya estarían dentro de nuestro criterio establecido. En este ajuste final, hemos retocado algunos de los materiales que ya habíamos modificado pero la mejora es poco apreciable en los resultados obtenidos.

Es importante destacar la influencia que ha tenido el material techo en el ajuste. Esta superficie es la más grande de todo el recinto y por ello se compone de un material que influye de gran manera a todos los puntos analizados. Al considerar este material como aire libre o un espacio abierto, no tenemos la posibilidad de retocar sus valores de absorción. Este hecho nos ha provocado retocar valores de materiales que influyen en cercanía a los puntos de interés, pero no poder alterar notablemente su coeficiente de absorción con el fin de conseguir un resultado “mejor” ya que estaríamos alterando la esencia del material y con ello alterando la realidad.

Resultados del ajuste final:

Zona A

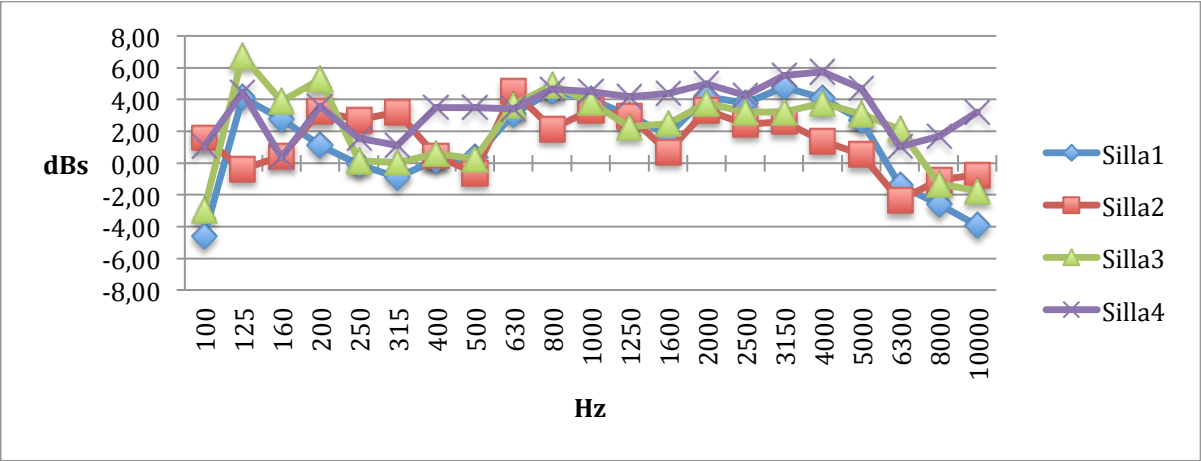


Fig. 7.18 Ajuste Final. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona B

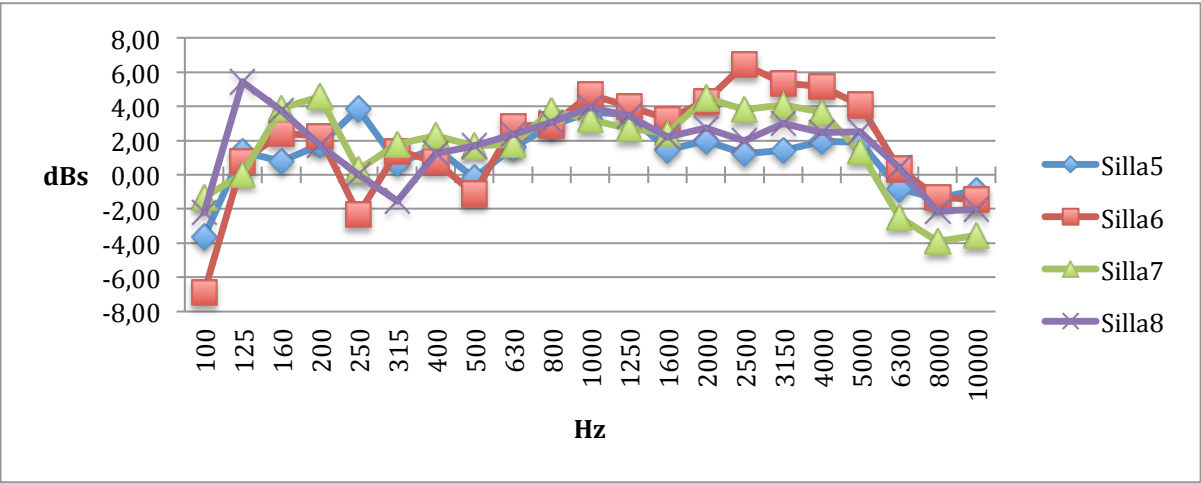


Fig. 7.19 Ajuste Final. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona C

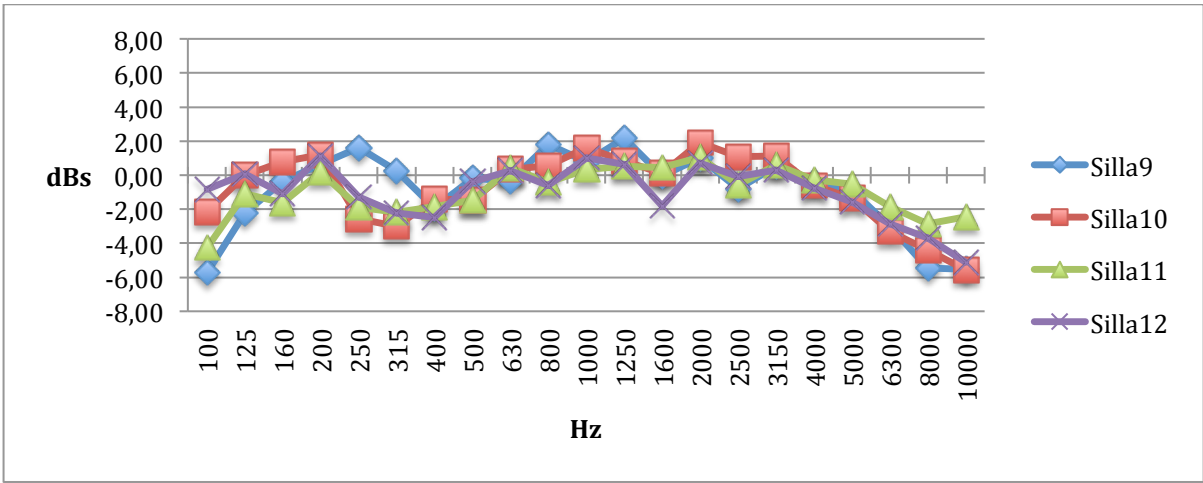


Fig. 7.20 Ajuste Final. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona D

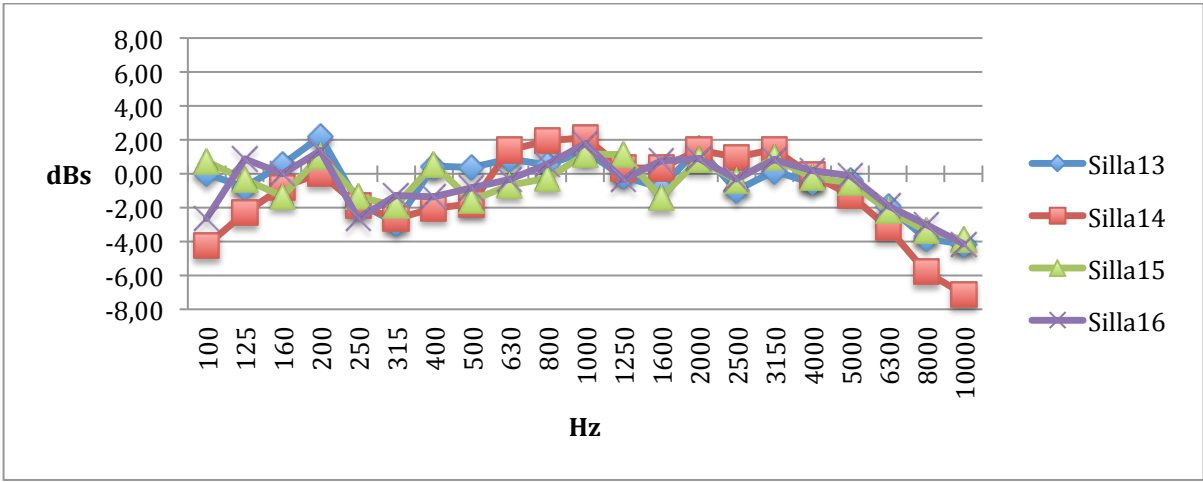


Fig. 7.21 Ajuste Final. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona E

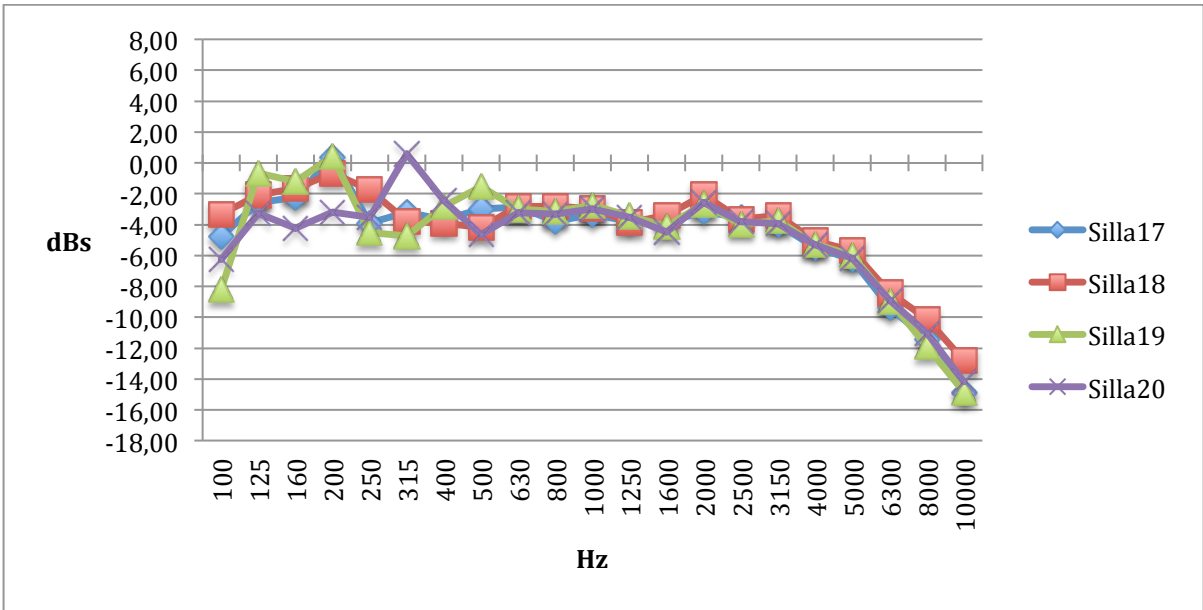


Fig. 7.22 Ajuste Final. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Zona F

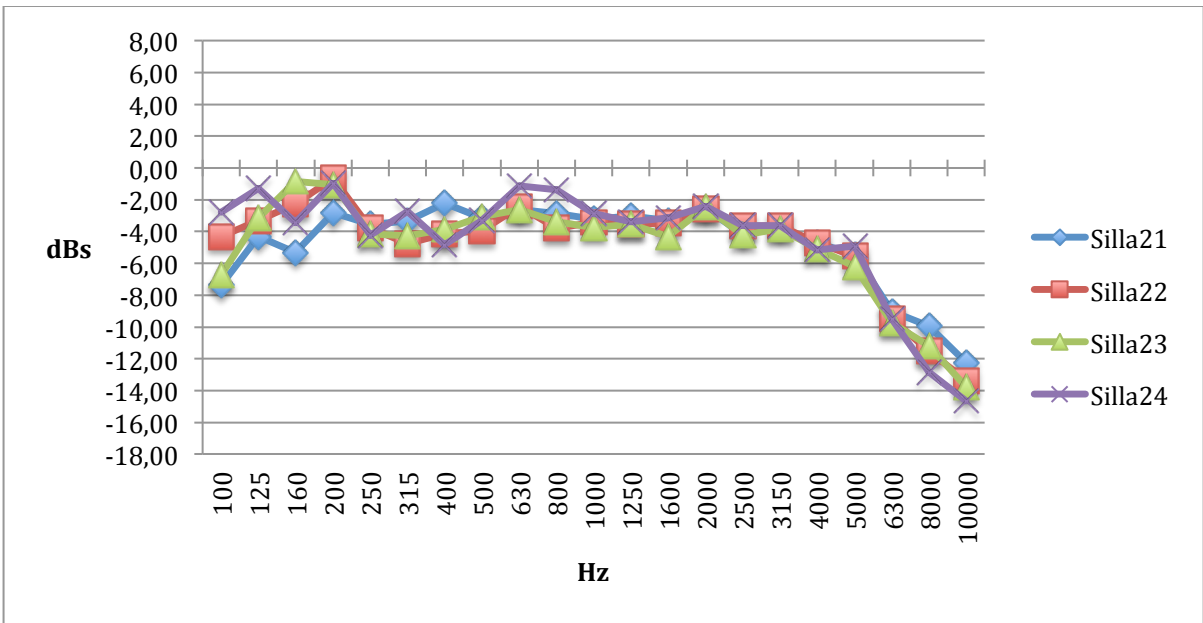


Fig. 7.23 Ajuste Final. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Escenario

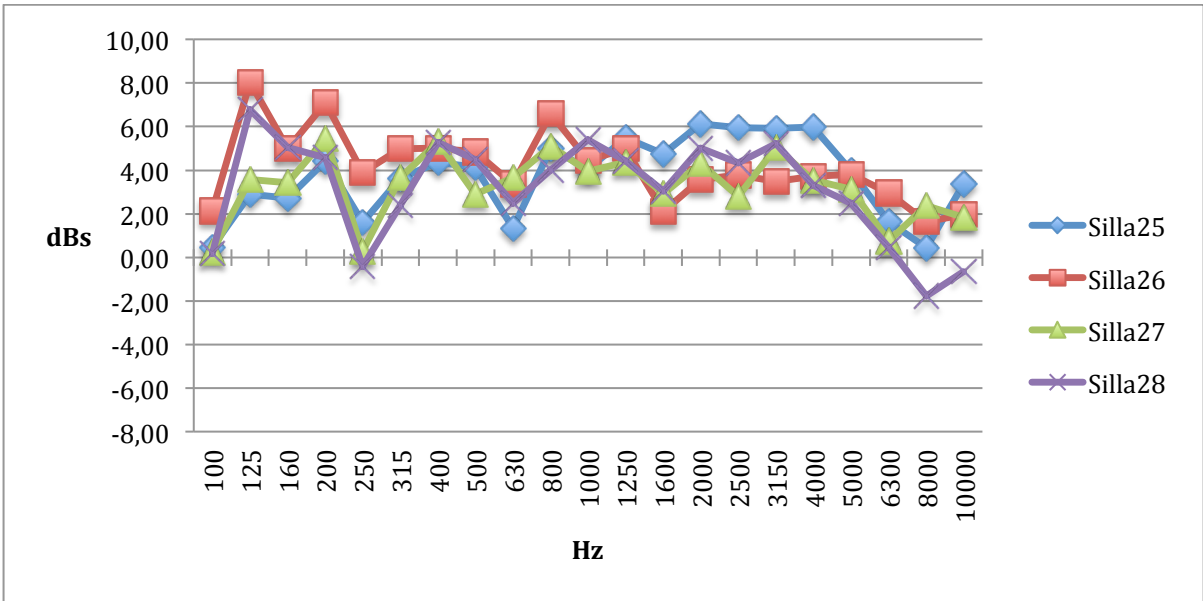


Fig. 7.24 Ajuste Final. Diferencia de niveles (Nivel medido - Nivel simulado)

Consideraciones finales:

Observando las gráficas resultado del ajuste final, podemos observar que las diferencias son mínimas respecto a los resultados de los pasos anteriores. A modo de computo global podemos obtener varias conclusiones:

Las gráficas obtenidas representan unos valores aceptables según nuestro criterio propuesto para el ajuste del modelo. Todos los valores se encuentran dentro de un margen de ± 6 dB salvo algún caso puntual. Dentro de estas excepciones destacar las zonas E y F donde comprobamos que para frecuencias superiores a 5 kHz nos alejamos del criterio establecido.

Observar también cómo el nivel simulado sufre una caída menor que el nivel medido a medida que aumentamos la frecuencia y la distancia.

Estas diferencias las basamos principalmente en la robustez de las medidas tomadas, como hemos comentado con anterioridad debido a las restricciones de acceso al recinto. Además las variaciones provocadas en las zonas E y F pueden deberse a que estamos midiendo en una zona bastante alejada de la fuente y en una posición donde estamos muy afectados por el campo “semi-libre” que origina la no existencia de techo en el patio. A ello debemos añadir la precisión del ensayo con la captura de una sola medida por posición, y además, sumarle las variaciones en la propagación del sonido afectadas por condiciones atmosféricas principalmente a alta frecuencia, las cuales incrementan notablemente la incertidumbre de las medidas. Cabe citar que el día y la hora en la que se realizaron las medidas, la temperatura era muy elevada, y, en esas condiciones, se producen fenómenos de propagación sonora que modifican la propagación sonora habitual de las ondas y que no son considerados por softwares de simulación tipo EASE. [14]

Añadir de cara a un trabajo futuro el análisis detallado de este tipo de localizaciones en los recintos con estas características y en diferentes situaciones atmosféricas, así como la continuación de este estudio con el ensayo de esta zona y aumentar la precisión de los resultados en esta parte.

Una vez ajustado el modelo los coeficientes de absorción y scattering finales utilizados han sido:

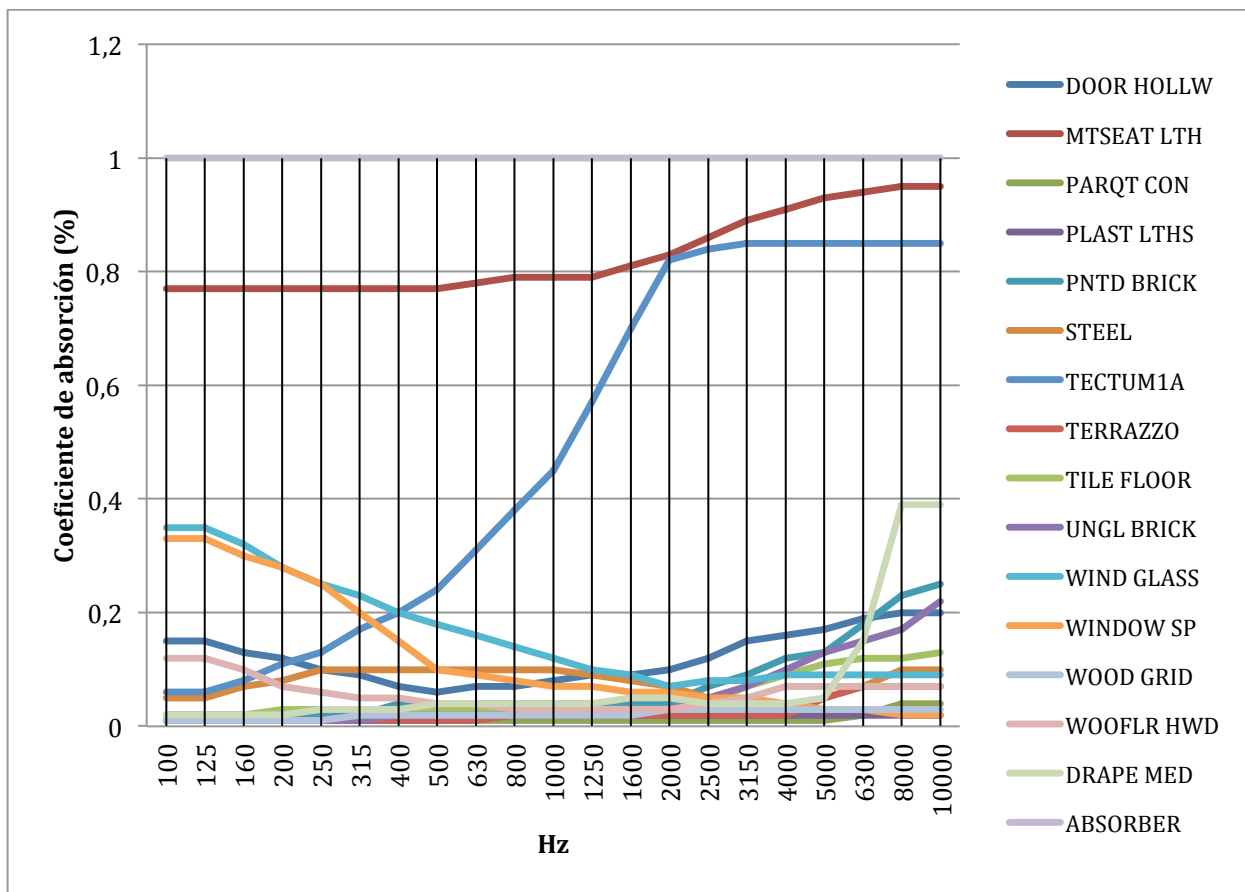


Fig. 7.25 Coeficientes de absorción del modelo ajustado

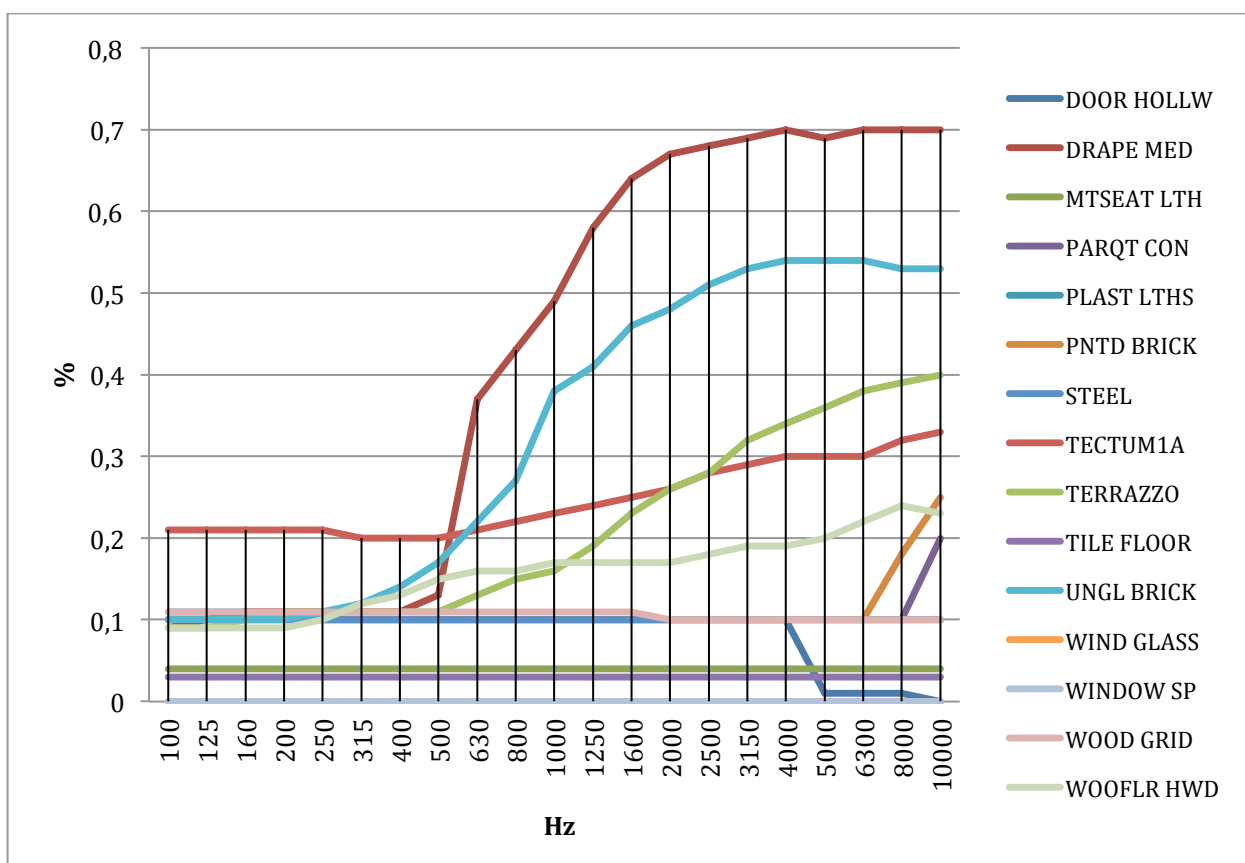


Fig. 7.26 Coeficientes de scattering del modelo ajustado

8. Resultados de la simulación

Una vez se ha considerado el modelo ajustado, podemos asegurar que el comportamiento es bastante parejo a la realidad, permitiendo que, los resultados obtenidos nos permitan extraer conclusiones sobre el comportamiento del recinto. De igual forma, modificaciones llevadas a cabo en el modelo, servirían para evaluar cómo sonaría el recinto en caso de que se llevara a cabo dichas modificaciones en la realidad. A continuación, se van a ofrecer una serie de resultados relativos a diferentes parámetros acústicos que EASE nos permite calcular gracias a la utilización de las herramientas que nos ofrece.

Cabe citar que, para que el software pueda presentar un mapa con los resultados calculados (por ejemplo el nivel de presión sonora), es necesario definir lo que se denomina Área de Audiencia. Dichos elementos no son áreas con características acústicas determinadas, sino zonas donde queremos calcular los resultados de la simulación.

8.1 Ray tracing y primeras reflexiones

La herramienta ray tracing de EASE nos permite el estudio de la propagación de los rayos sonoros que emite la fuente. Los rayos se propagan por el aire del recinto y su trayectoria se dibuja hasta alcanzar un limite preestablecido. Se habla de rayos de orden 0 a los rayos sonoros que, surgiendo de la fuente sonora, no han sufrido todavía ninguna reflexión. Rayos de orden 1, a los rayos que han chocado contra una superficie, y así sucesivamente.

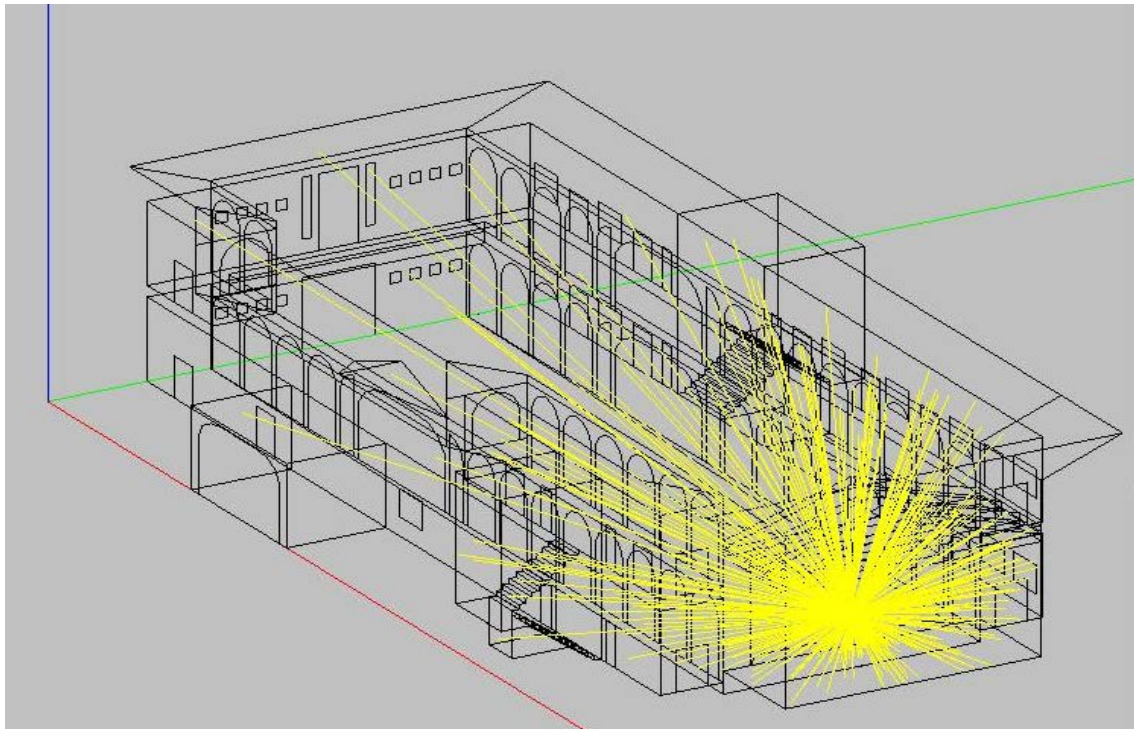


Fig. 8.1 Vista trazado de rayos de orden 0

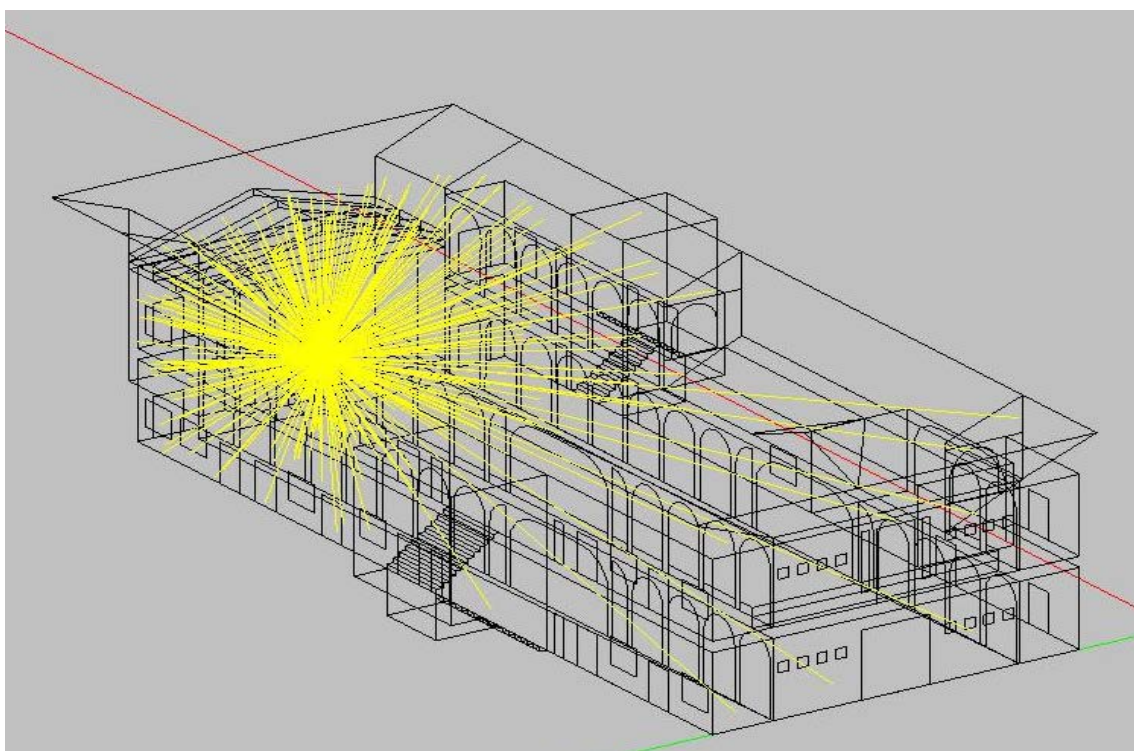


Fig. 8.2 Vista trazado de rayos de orden 0

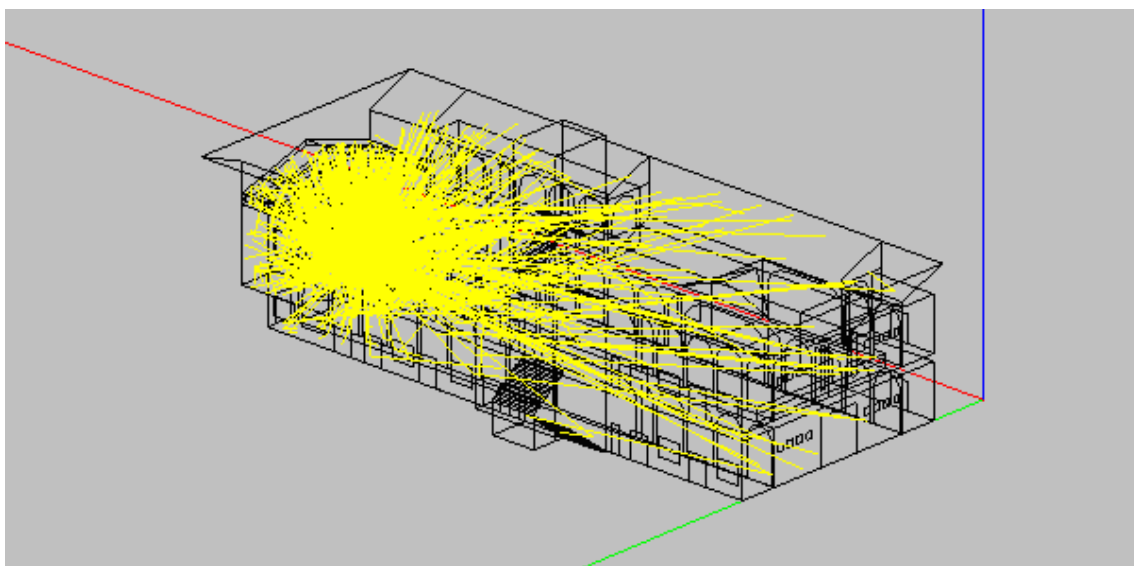


Fig. 8.3 Vista trazado de rayos de orden 1

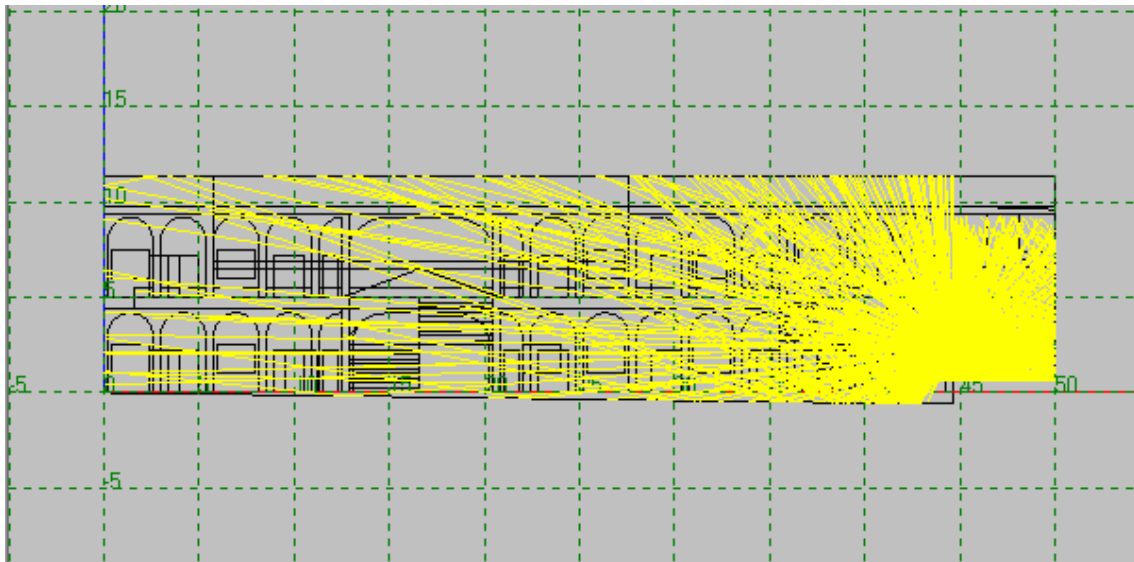


Fig. 8.4 Vista trazado de rayos de orden 1 Perfil

En la Fig. 8.4 podemos observar cómo los rayos que chocan contra el techo de nuestro recinto no rebotan en él sino que se termina su trazado. Este hecho es debido al coeficiente de absorción total que hemos añadido a esta superficie simulando el aire libre.

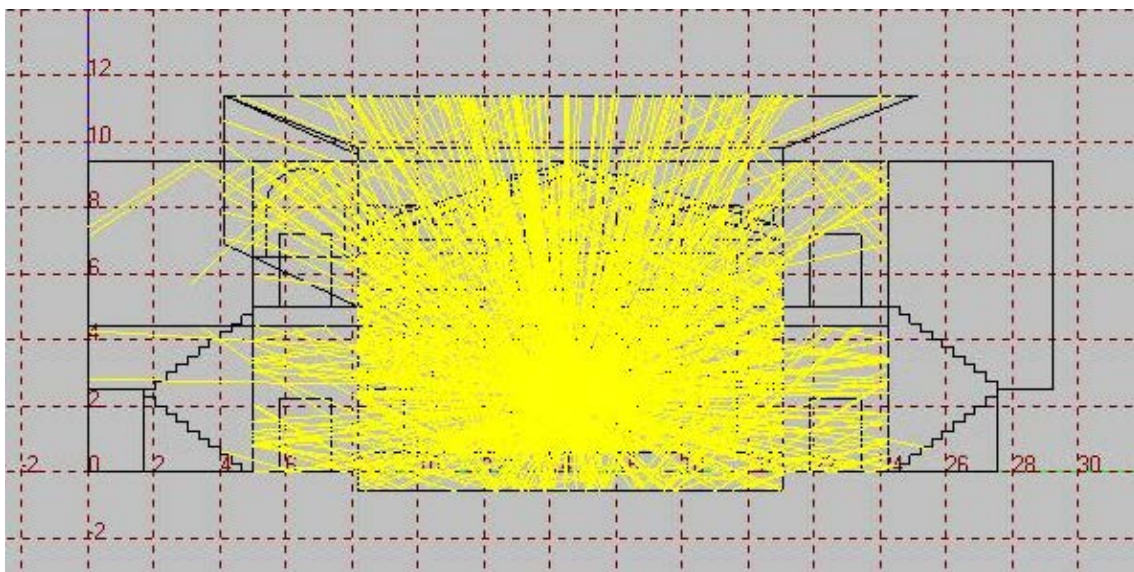


Fig. 8.5 Vista trazado de rayos de orden 1 Alzado

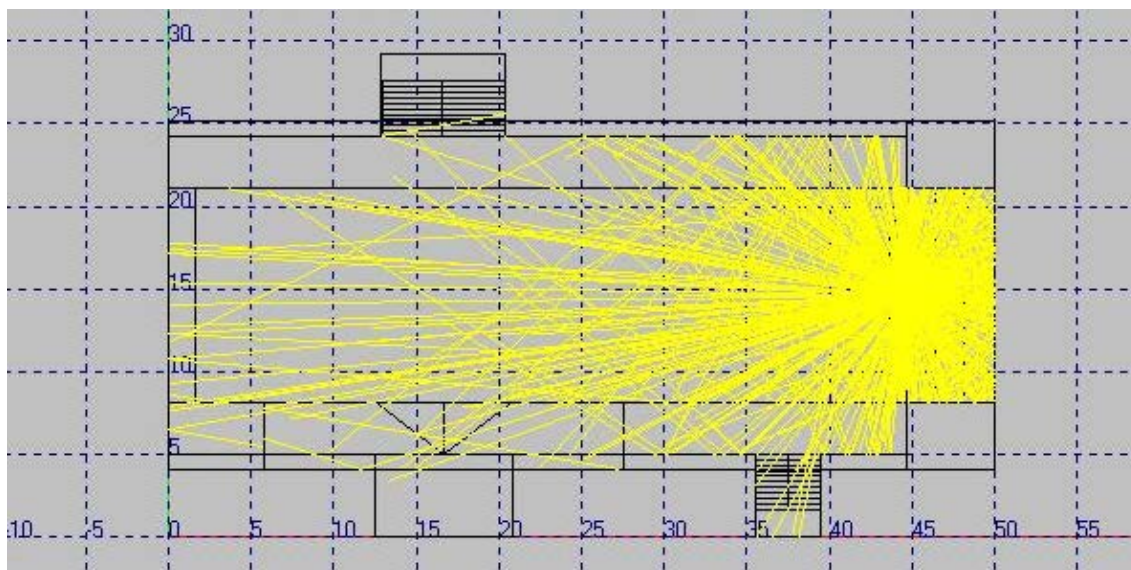


Fig. 8.6 Vista trazado de rayos de orden 1 Planta

8.2 SPL total

Esta herramienta ha sido utilizada a la hora de realizar el ajuste para medir el nivel de presión en los puntos en los que estábamos interesados. Nos proporciona el nivel total, nivel de campo directo más el nivel de campo reverberante, que existe en las áreas de interés o en puntos concretos. Podemos ver el efecto de sombra acústica producido por las columnas más cercanas a la fuente. A medida que nos alejamos de ésta, dicho efecto desaparece.

Cabe comentar que, en este apartado del trabajo, únicamente se incluyen resultados de los mapas de nivel a la frecuencia de 1 kHz. Sin embargo, el lector interesado puede encontrar el resto de resultados en el Anexo 2.

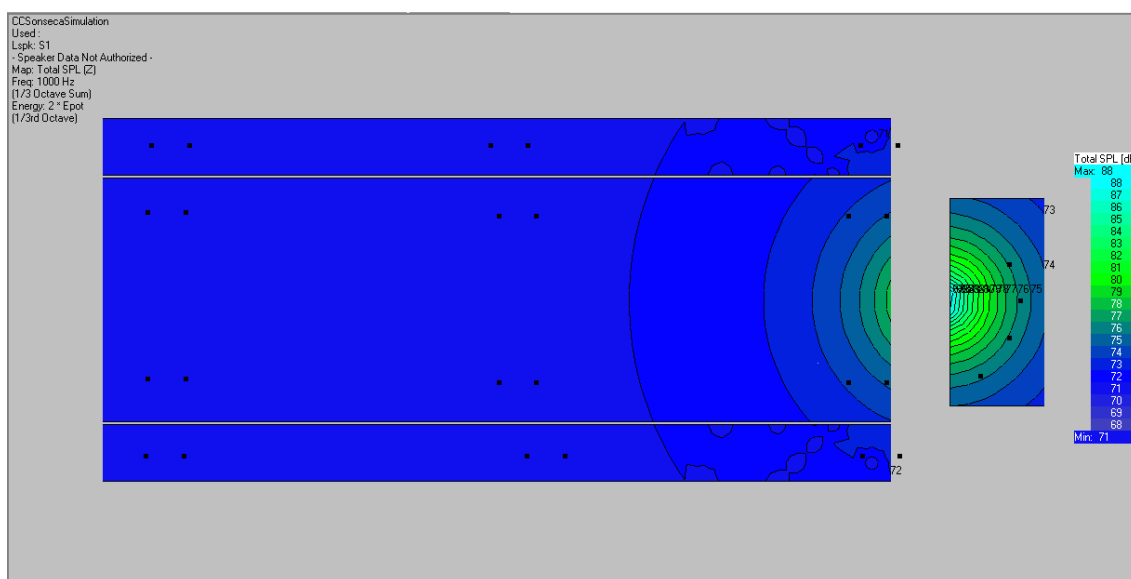


Fig. 8.7 Mapa distribución SPL (tercio de octava de 1 kHz)

8.3 SPL directo

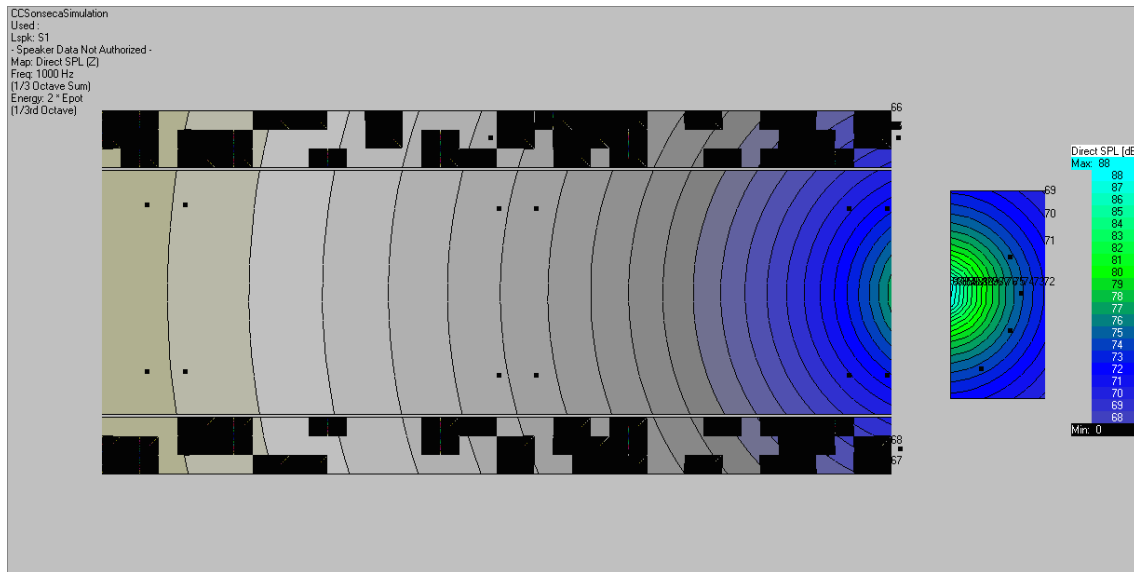


Fig. 8.8 Mapa distribución SPL directo (tercio de octava de 1 kHz)

Las zonas pintadas en color negro representan las zonas donde no existe nivel directo, todas ellas corresponden a los pasillos.

8.4 Relación Campo Directo / Campo Reverberante

El siguiente mapa muestra la relación que existe entre el campo directo y el campo reverberante en el recinto. Podemos ver la representación de la distancia Crítica con el valor 0 que nos indica la zonificación donde se cumple que el campo directo es igual al campo reverberante.

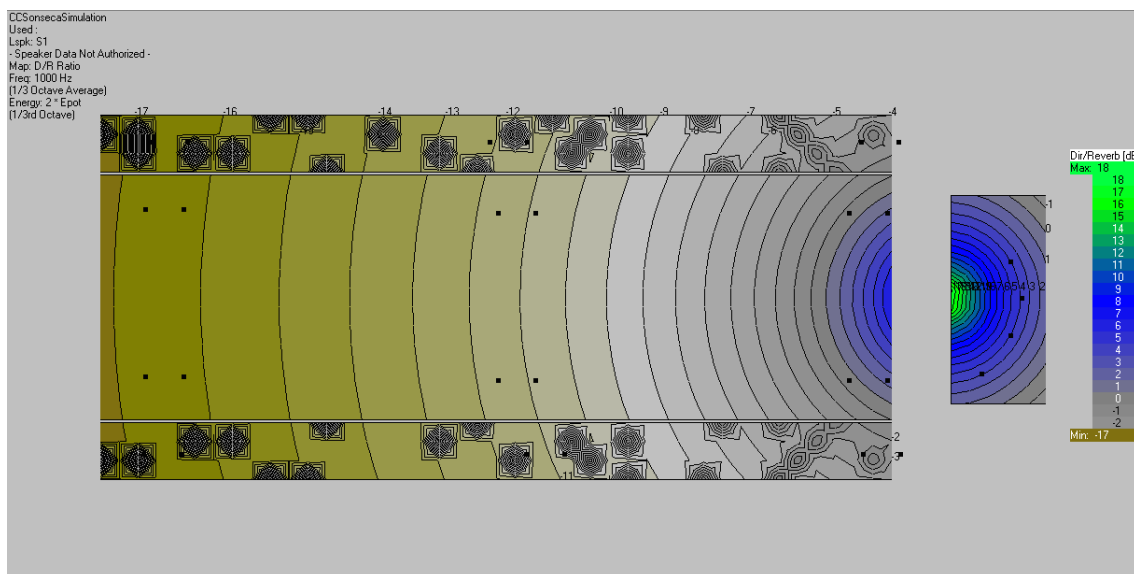


Fig. 8.9 Mapa relación D/R (tercio de octava de 1 kHz)

8.5 % ALCons

El parámetro %ALCons es un indicador de la pérdida porcentual de articulación de las consonantes. Se utiliza para cuantificar la inteligibilidad del habla. Utilizando esta herramienta simulamos el comportamiento del recinto frente al caso de una persona hablando en el escenario.

El parámetro depende principalmente de dos factores: uno de ellos la relación entre campo directo y reverberante (que el modelo estima para cada posición), y otro el ruido de fondo existente en el recinto. Esta última magnitud se ha obtenido por medio de las medidas de ruido de fondo realizadas in situ, promediando energéticamente las medidas de todas las posiciones para obtener el dato tal y como lo requiere el software, es decir, suponiendo que todo el recinto está sometido a la misma cantidad de ruido de fondo.

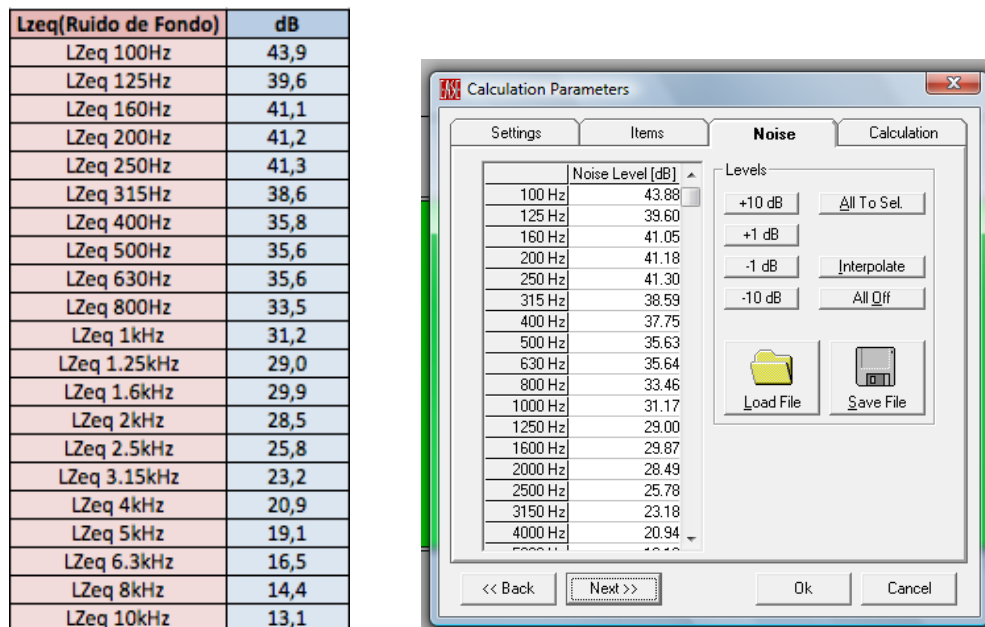


Fig. 8.10 Configuración del Ruido de Fondo

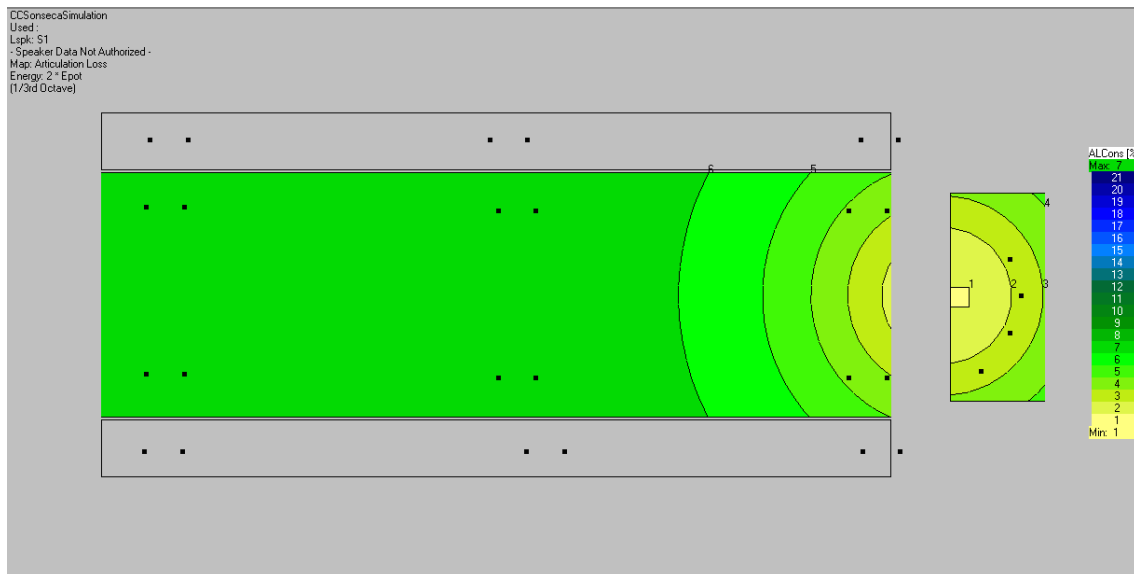


Fig. 8.11 Mapa %ALCons (tercio de octava de 1 kHz)

Para considerar un resultado aceptable, los valores deben situarse por debajo de un 5%. En nuestro caso EASE sufre una incongruencia al simular este parámetro en los pasillos laterales y no puede ofrecernos un resultado para ellos, lo cual, nos indica que esta zona no es viable. Por otro lado los resultados obtenidos para el escenario y el patio central nos muestran las carencias del recinto ya que sólo sería viable la escucha en la zona más próxima al escenario (Sillas 2, 4, 5 y 7). Estos datos nos muestran la necesidad de un equipo de refuerzo sonoro de cara a una mejora acústica. El recinto cuenta con un equipo de refuerzo sonoro formado por: dos cajas acústicas D.A.S PF215 Series de 700 Watt colocadas en el frontal del escenario y ocho cajas acústicas Akiyama PB-10 de 150 Watt distribuidas cuatro a cada lado de la audiencia en las columnas que separan el patio central de los pasillos laterales. La simulación y análisis considerando el sistema de refuerzo sonoro contemplado es un punto de interés de cara a un estudio futuro.

8.6 Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación simulado por EASE corresponde con la siguiente figura:

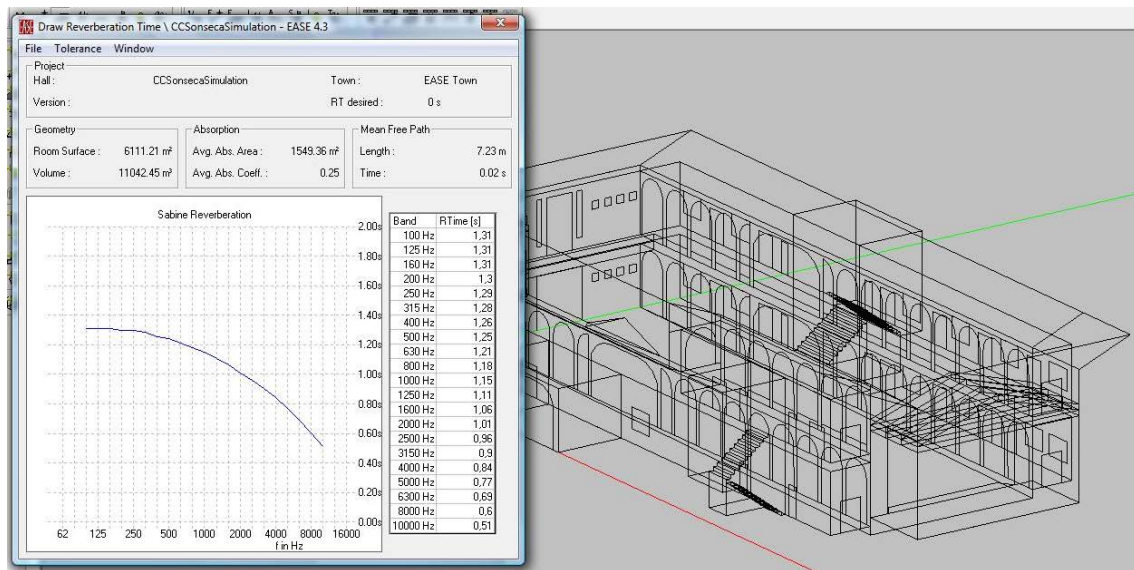


Fig 8.12 T60 simulado

Como puede observarse, el tiempo de reverberación estimado presenta una variación en frecuencia similar al medido, si bien, este último es ligeramente superior. Dicha diferencia puede deberse, perfectamente, a la incertidumbre asociada al hecho de haber medido exclusivamente una sola medida de T60 con el método de fuente interrumpida. [12]

Como trabajo futuro se podría intentar realizar más medidas utilizando dicho método, o utilizar el método de respuesta impulsiva integrada (en caso de que se disponga de instrumentación en la universidad), el cual, con un número de medidas más reducido que el de fuente interrumpida, obtiene una incertidumbre menor.

9. Conclusiones y trabajos futuros

Una vez realizada la simulación con EASE, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El patio auditorio Casa de la Cultura de Sonseca no es un recinto construido con un propósito de confort acústico. Es por ello que, aparecen carencias acústicas que han sido reflejadas en este estudio.
- Los resultados nos aportan información de cómo es la distribución del campo sonoro en el recinto. Los mapas obtenidos (distribución del nivel de presión sonora, nivel directo, %ALCons, relación de campo directo-reverberante), nos ofrecen una imagen gráfica de dicha distribución aportando información por zonas para cada uno de estos parámetros.
- Después de analizar los resultados simulados, se puede concluir la necesidad de un equipo de refuerzo sonoro para solventar las dificultades de distribución sonora, inteligibilidad y sombras acústicas en el recinto.
- El ensayo realizado en el recinto nos ha proporcionado los parámetros de ajuste del modelo, mediante los cuales, se ha podido simular la situación acústica actual del recinto. A pesar de las restricciones de acceso y la robustez limitada en cuanto a incertidumbre, se ha podido esbozar un mapa del recinto completo.
- EASE es una potente herramienta que nos ha servido de ayuda para simular el comportamiento del campo acústico dentro del recinto. El problema es que basa sus cálculos en la teorías estadística y geométrica, y, en ocasiones, este procedimiento no es suficiente para llegar a un resultado totalmente correcto.
- El tiempo de reverberación simulado es más bajo que el medido en el ensayo “in situ”, se atribuye este hecho a la baja robustez de la medida causada por las restricciones de acceso al recinto, reduciendo la posibilidad de un resultado de compromiso.
- Por último, la realización de este TFG ha reforzado mi interés por el mundo de la acústica y el sonido y me ha motivado a continuar mi formación en este área.

De cara a trabajos futuros o extensiones de este trabajo, sería de interés profundizar en algunos de estos aspectos:

- Realizar nuevas medidas en el interior del recinto con mayor precisión salvando las restricciones de acceso impuestas para este trabajo.
- El estudio concreto de la zona más alejada del escenario y el comportamiento del campo sonoro en esta parte del recinto.

- Cuando se ha desarrollado la simulación del recinto y siguiendo las recomendaciones del software, se ha incluido una superficie techo dotándola de un coeficiente de absorción total simulando de esta manera el aire libre. Ahora bien, esta cota la hemos ajustado bajo nuestro propio criterio, siguiendo las recomendaciones del software pero sin una justificación en la altura elegida concreta, ¿qué ocurriría si hubiéramos utilizado otra cota diferente? Si nos basamos en las teorías estadística y geométrica utilizadas por EASE para los cálculos de T60 o Mapping SPL, podemos pensar que los parámetros simulados podrían variar al modificar el volumen del recinto y sus áreas de absorción.

Por estos motivos, sería interesante el estudio de la influencia de la altura elegida para la cota del cielo en la simulación de recintos al aire libre. Estudiar recintos de diferentes configuraciones, tamaños, etc., utilizando las herramientas de trazado de rayos que el software nos ofrece e intentar parametrizar si es posible la influencia de este elemento.

- Proponer en base al estudio realizado un sistema de refuerzo sonoro que mejore el confort acústico. Analizar el equipo de refuerzo sonoro existente y sus efectos en el recinto.
- Estudiar la influencia de la presencia de público en el campo sonoro creado en el recinto.

9. Conclusions and future work.

After simulation with EASE software, we can draw the following conclusions:

- The House of Culture Auditorium Sonseca is not an enclosure with an acoustic work. Therefore, it suffers many acoustic cadences that have been considered in this study.
- The results provide us information about the sound field distribution inside the enclosure. The obtained maps (Sound Pressure Level map, direct Sound Pressure Level map, %ALCons, Direct/Reverberant field ratio) give us an overview of a graphic image of that distribution supporting zonal information for each one of these parameters.
- After analyzing the simulated results, we can conclude the need of sound reinforcement equipment to overcome the difficulties of sound distribution in the enclosure, intelligibility and acoustic shadows.
- The trial in the enclosure provides us the model fit, trying to play the most of their actual behavior. Despite the restrictions, and the limited robustness of the measurements, we were able to outline a real full measure.
- EASE is a powerful tool that has allowed us to simulate the behavior of the sound field inside the enclosure, but sometimes its calculations on the geometric and statistical theories, to base it has failed to fully represent actual field behavior.
- The simulated reverberation time is a little bit shorter than the time measured in the test, we attribute this success to the low robustness of our measure caused by the time restrictions, reducing the possibility of a compromised result.
- The realization of this final degree project has given me a different and more attractive view in the acoustic and sound area, and has motivated me to continue increasing my knowledge in this area.

For future studies and extensions of this work would be interesting to delve into some of these ideas:

- Make new measurements within the enclosure with higher degree of accuracy and saving temporary access restrictions.
- The concrete study of the most secluded area of the stage and the behavior and simulation of the sound field in this part.
- When the simulation has been developed and according to the recommendations of the software, we have included a roof surface giving it a total absorption coefficient thus simulating the free field. However, we

have set this level with our own judgment, following the software recommendations but without specific justification in the chosen height, what would have happened if we had used a different dimension? If we rely on statistical and geometrical theories used by EASE in order to calculate T60 and SPL Mapping, we can think that the simulated parameters could vary by changing the volume of the enclosure and their absorption areas.

For these reasons, it would be interesting to study the influence of the chosen height of heaven in simulating outdoor enclosures. Studying halls of different configurations, sizes, etc., and using ray tracing tools that the software offers and try to parameterize the influence of this element if it is possible.

- Base on the study on a series of acoustic solutions to improve the characteristics of the enclosure.
- Conduct a study of sound reinforcement equipment deployed in the enclosure.
- Study the influence of the public in the sound field of the room.

10. Bibliografía

- [1] La acústica de los teatros a través de la historia. Ángel Luis León Rodríguez. Actas del segundo Congreso Nacional de Historia de la construcción, A Coruña 22-24 octubre 1998.
- [2] Diseño Acústico de espacios arquitectónicos. Antoni Carrión Isbert. 1ª Edición: julio 1998.
- [3] Acondicionamiento Acústico. Manuel Recuero López. Paraninfo, 2001. International Thomson Editores Spain Paraninfo S.A.
- [4] ABC de la Acústica Arquitectónica, Higini Arau, Grupo Editorial Ceac S.A., 1999.
- [5] Ingeniería Acústica, Manuel Recuero López, Editorial Paraninfo, 2000.
- [6] http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_08_09/io6/public_html/Paginas/modos.html
- [7] Estudio acústico de la Sala 25 Cines Kinopolis. PFC: Juan Carlos Prieto Hernández. UC3M.
- [8] Memorias y Curiosidades de la Historia de Sonseca, Manuel Ballesteros Peces, 1994, Sonseca (Toledo).
- [9] Memorias y Curiosidades de la Historia de Sonseca, Manuel Ballesteros Peces, Suplemento N°1, 2004, Sonseca (Toledo).
- [10] User's guide and tutorial EASE 4.3. Renkus-Heinz.
- [11] UNE-EN ISO 3382-1:2009 (Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos).
- [12] UNE-EN ISO 3382-2:2008 (Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de reverberación en recintos ordinarios).
- [13] Estudio acústico del Teatro-Circo Price. PFC: Carlos Pelegrín Carballo. UC3M.
- [14] UNE-EN ISO 1996-2:2009 (Descripción, medición y evaluación del ruido ambiental).
- [15] <http://www.bksv.es>
- [16] <http://www.gras.dk>

Anexo 1. Resultados del ensayo

Datos del nivel SPL en cada punto:

Fig 12.1 SPL medido (tercio de octava de 125 Hz)

Fig 12.2 SPL medido (tercio de octava de 250 Hz)

Codigo colores
84-87
81-83
78-81
75-78
72-75
69-72

Fig 12.3 SPL medido (tercio de octava de 500 Hz)

Codigo colores
79-82
77-79
74-77
71-74
68-71
65-68

Fig 12.4 SPL medido (tercio de octava de 1 kHz)

Mapa de nivel de presión sonora								Frecuencia: 2kHz							
A	B	C	D	E	F	G	H								
		82,3	79,5		80,4										
	82,2		Escenario			80,4									
PASILLO_1							PASILLO_2								
	79,7		FUENTE			79,5									
1	76,2	77,5	77,8	79,6	79,5	79,3	76,2	76,3	escaleras	Valor Máxim	82,3	Codigo colores			
2	75,5	78,0	78,6	79,3	78,2	79,4	77,6	74,4		Valor Mínim	66,3	80-83			
3	75,0	77,5	75,0	77,1	75,5	76,1	76,7	75,1				77-80			
4	76,2	75,5	74,6	76,1	74,1	75,1	74,7	75,8				74-77			
5	74,2	74,0	74,0	74,0	73,9	74,0	73,2	72,3				71-74			
6	74,9	74,1	74,0	74,3	72,9	74,0	73,0	75,4				68-71			
7	72,5	72,1	71,8	72,3	71,4	71,6	73,3	72,4				65-68			
8	72,7	71,4	72,7	71,9	72,0	73,3	72,4	72,8							
9	71,0	71,9	72,7	71,8	72,0	71,0	71,5	71,4							
10	70,9	70,6	71,6	71,7	70,9	70,1	70,8	70,8							
11	70,1	69,3	69,8	68,2	69,6	69,3	69,7	71,2							
12	69,5	68,7	68,6	68,5	69,0	68,4	68,8	69,0							
13	68,7	68,3	68,6	68,1	68,7	68,1	68,7	68,3							
14	67,6	68,2	68,4	68,3	68,3	67,6	68,6	67,5							
15	67,6	68,1	68,6	68,1	67,7	68,0	68,3	68,7							
16	67,4	67,6	67,0	67,6	67,1	67,1	67,7	67,4							
17	66,3	67,6	67,4	66,9	68,0	67,1	67,1	66,9							
18	66,8	67,1	67,3	66,8	66,6	66,6	67,2	67,1							
19	66,5							67,2							
20	67,0														

Fig 12.5 SPL medido (tercio de octava de 2 kHz)

Mapa de nivel de presión sonora								Frecuencia: 4kHz							
A	B	C	D	E	F	G	H								
		76,9	74,5		74,4										
	74,0		Escenario			73,4									
PASILLO_1							PASILLO_2								
	73,7		FUENTE			73,6									
1	70,5	70,2	72,7	73,8	73,3	72,6	70,9	71,6	escaleras	Valor Máxim	76,9	Codigo colores			
2	69,9	73,3	72,3	75,5	73,6	74,8	71,3	68,6		Valor Mínim	58,1	74-77			
3	69,1	72,7	68,7	72,0	69,6	68,9	72,8	67,9				71-74			
4	71,1	68,9	68,4	71,6	68,7	69,3	69,4	67,9				68-71			
5	68,2	68,7	68,5	70,4	68,3	69,9	66,6	66,9				65-68			
6	69,6	67,1	67,3	68,4	66,3	67,2	66,4	67,0				62-65			
7	65,5	66,6	66,4	68,0	65,7	66,1	65,7	65,6				58-62			
8	65,6	64,7	66,2	66,0	64,1	66,3	64,8	66,4							
9	63,7	63,5	64,2	64,6	64,2	64,0	63,6	64,0							
10	63,7	63,3	63,5	64,3	63,0	63,0	63,8	64,2							
11	62,3	61,4	61,9	61,4	62,5	62,7	62,5	63,6							
12	62,0	61,1	61,0	60,9	62,5	61,8	62,0	62,5							
13	61,1	60,1	60,4	61,1	60,2	60,8	61,4	60,9							
14	60,0	59,8	60,1	59,8	60,4	59,8	60,7	60,8							
15	59,0	59,6	59,3	59,3	59,5	59,8	59,2	60,2							
16	59,2	58,9	58,3	58,5	58,9	59,5	59,0	59,5							
17	58,8	58,6	58,9	58,1	58,9	59,1	59,0	59,2							
18	58,3	58,4	58,4	58,3	58,1	58,4	58,6	59,0							
19	58,3							58,6							
20	58,4														

Fig 12.6 SPL medido (tercio de octava de 4 kHz)

Promedio de los valores de Ruido de Fondo del recinto:

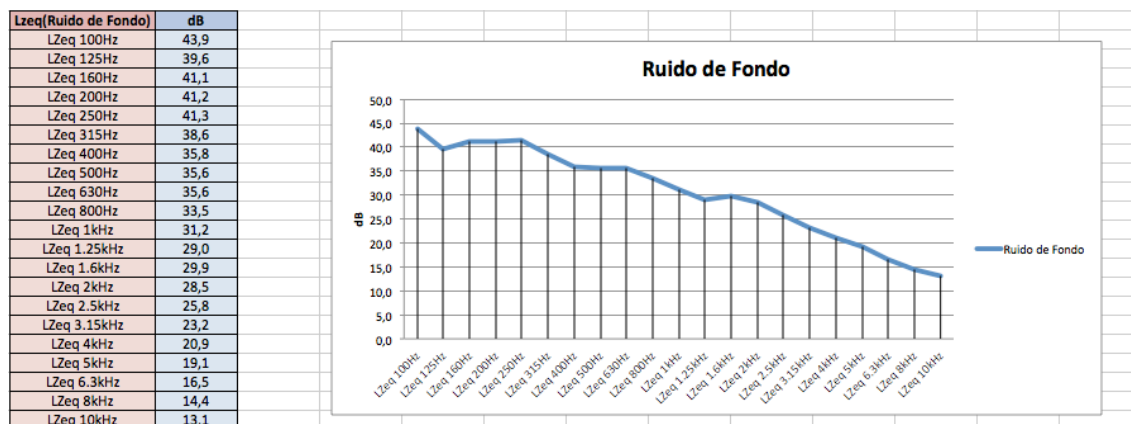


Fig 12.9 Ruido de Fondo promediado en el recinto

SPL medido a la distancia de 1 m de la fuente en cámara anecoica.

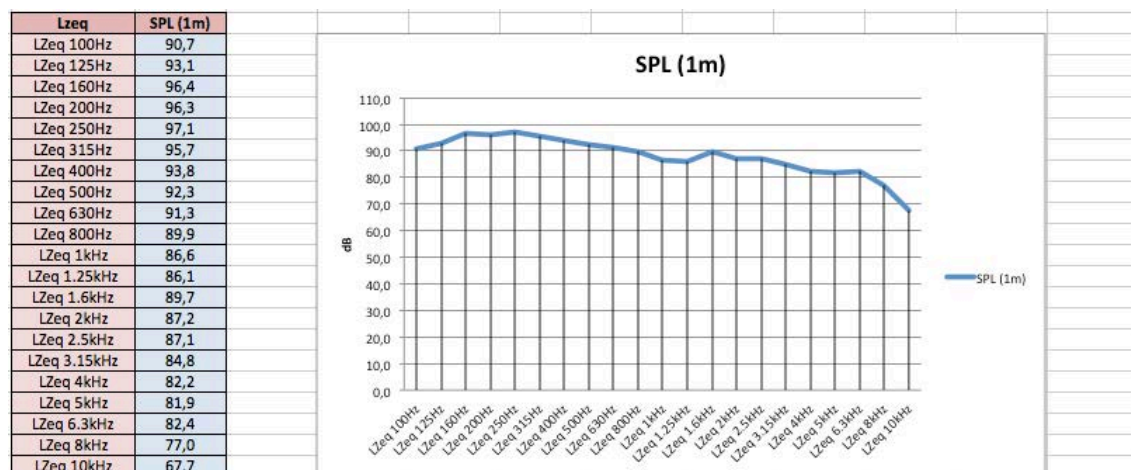


Fig 12.9 SPL (1m) de la fuente

Podemos ver el resultado de todas las medidas tomadas en el ensayo en el siguiente enlace: http://www.tsc.uc3m.es/~azpicueta/AA12_TFG_JGR.pdf

Anexo 2. Resultados de la simulación

SPL total

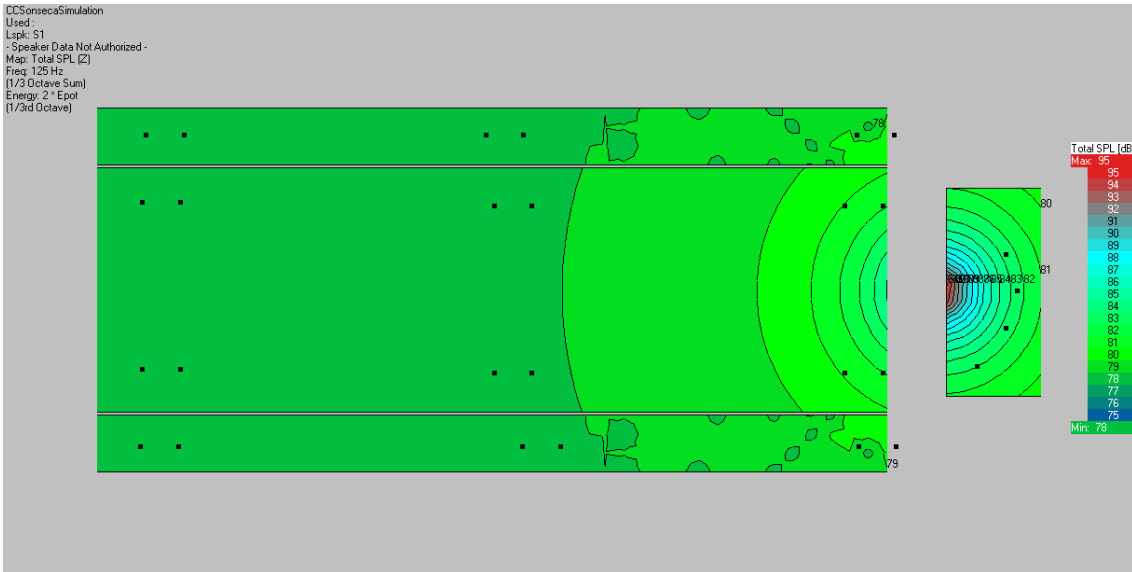


Fig 12.8 Mapa distribución SPL (tercio de octava de 125 Hz)

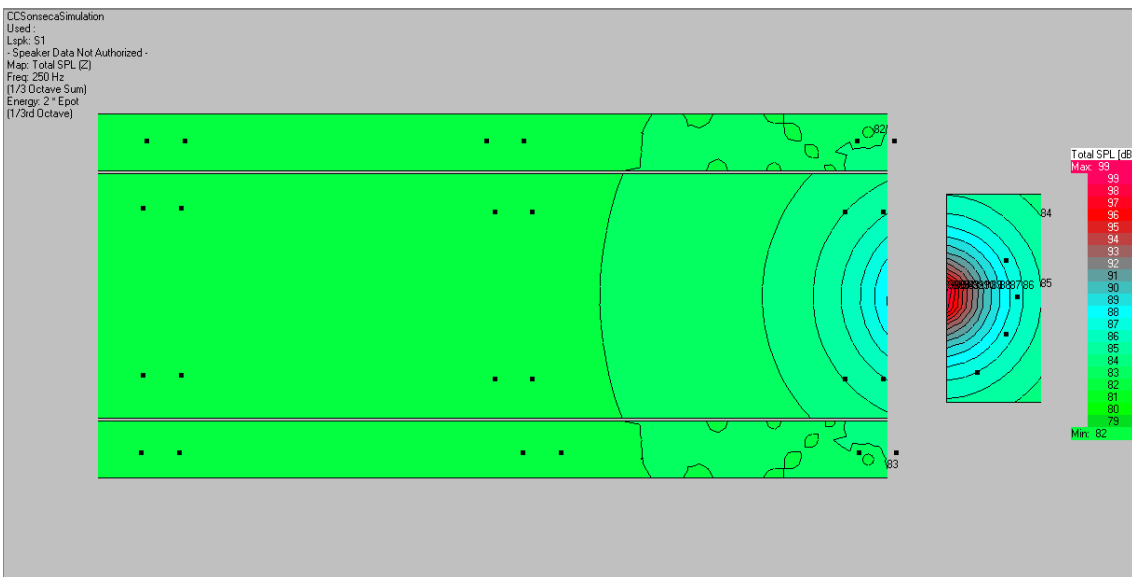


Fig 12.9 Mapa distribución SPL (tercio de octava de 250 Hz)

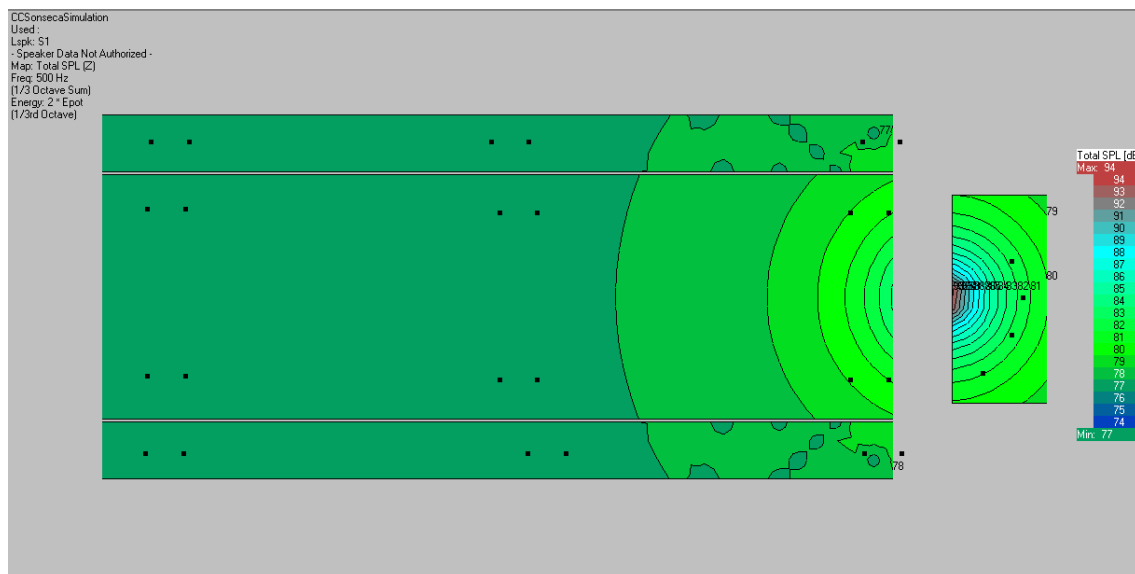


Fig 12.10 Mapa distribución SPL (tercio de octava de 500 Hz)

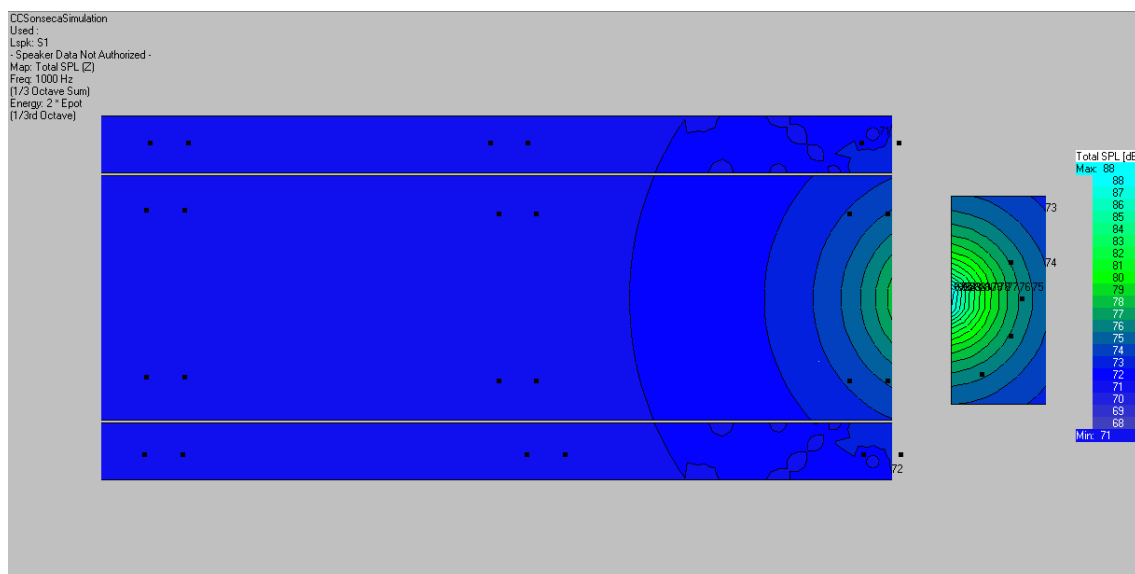


Fig 12.11 Mapa distribución SPL (tercio de octava de 1 kHz)

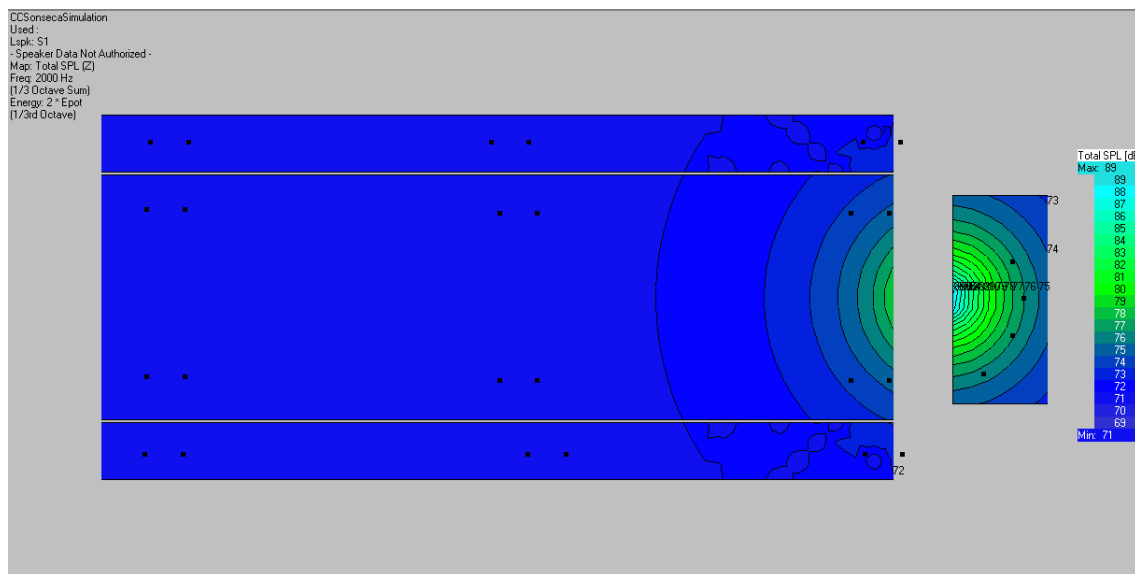


Fig 12.12 Mapa distribución SPL (tercio de octava de 2 kHz)

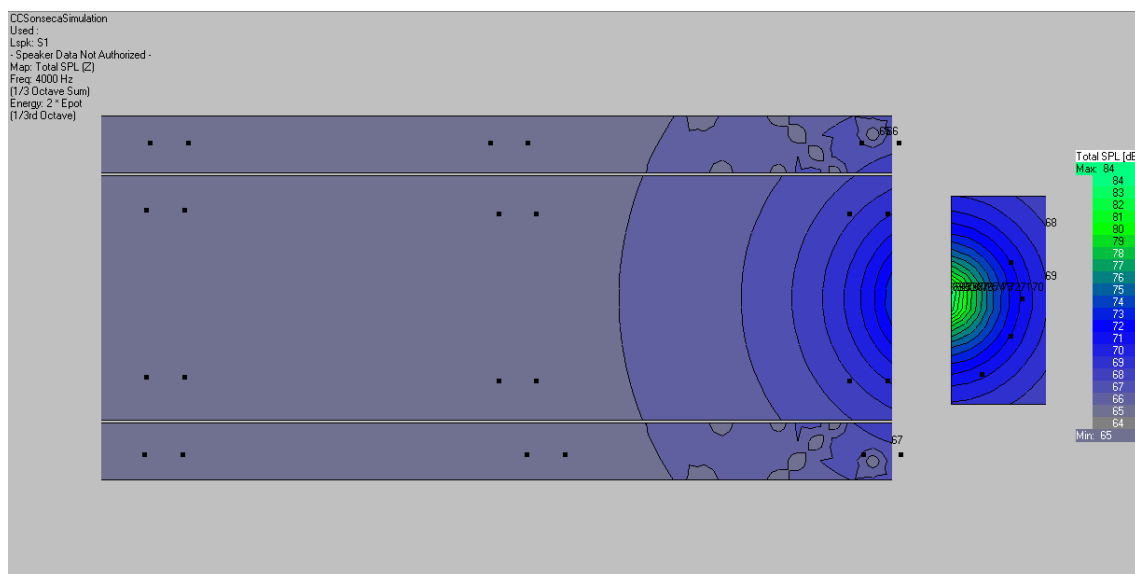


Fig 12.13 Mapa distribución SPL (tercio de octava de 4 kHz)

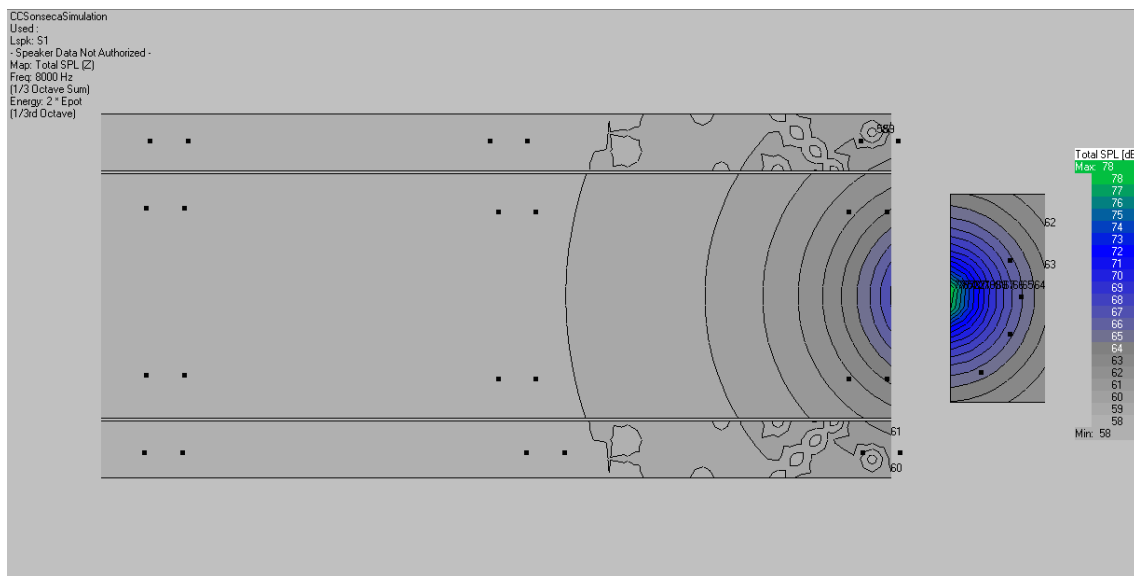


Fig 12.14 Mapa distribución SPL (tercio de octava de 8 kHz)

SPL directo

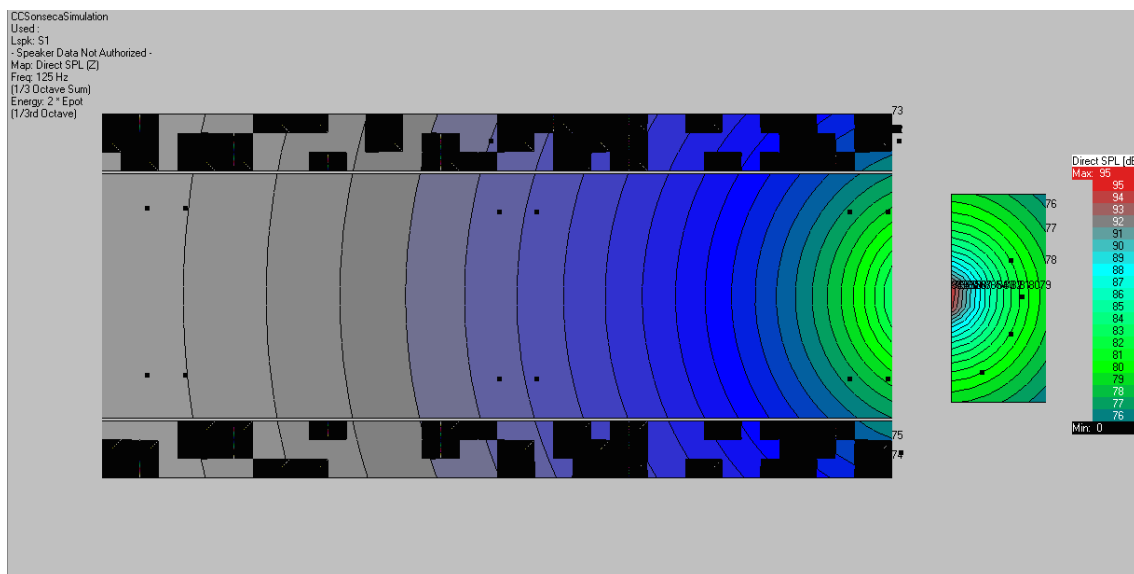


Fig 12.15 Mapa distribución SPL directo (tercio de octava de 125 Hz)

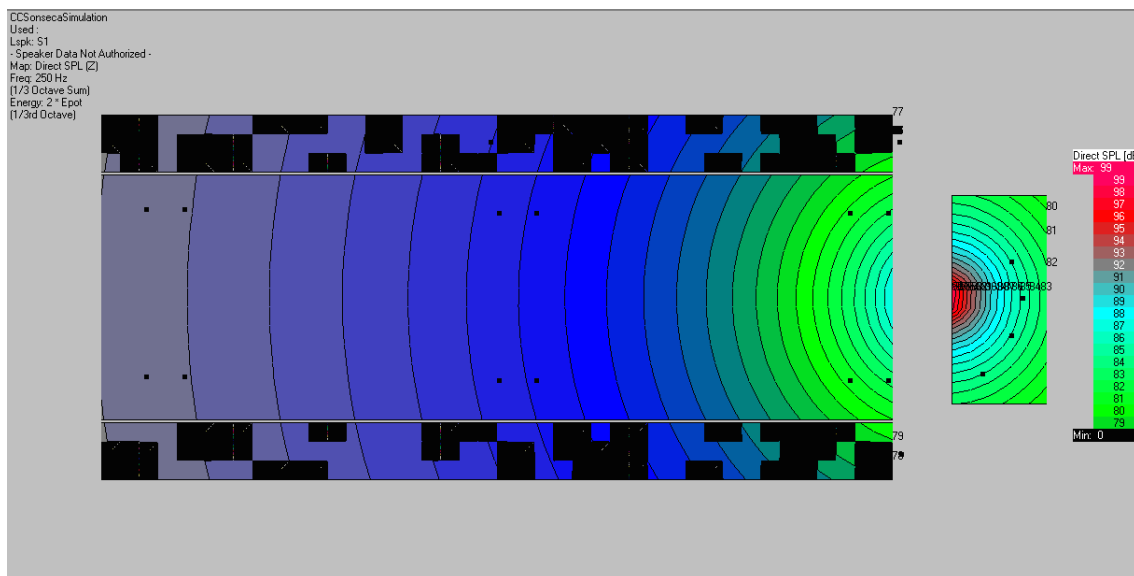


Fig 12.16 Mapa distribución SPL directo (tercio de octava de 250 Hz)

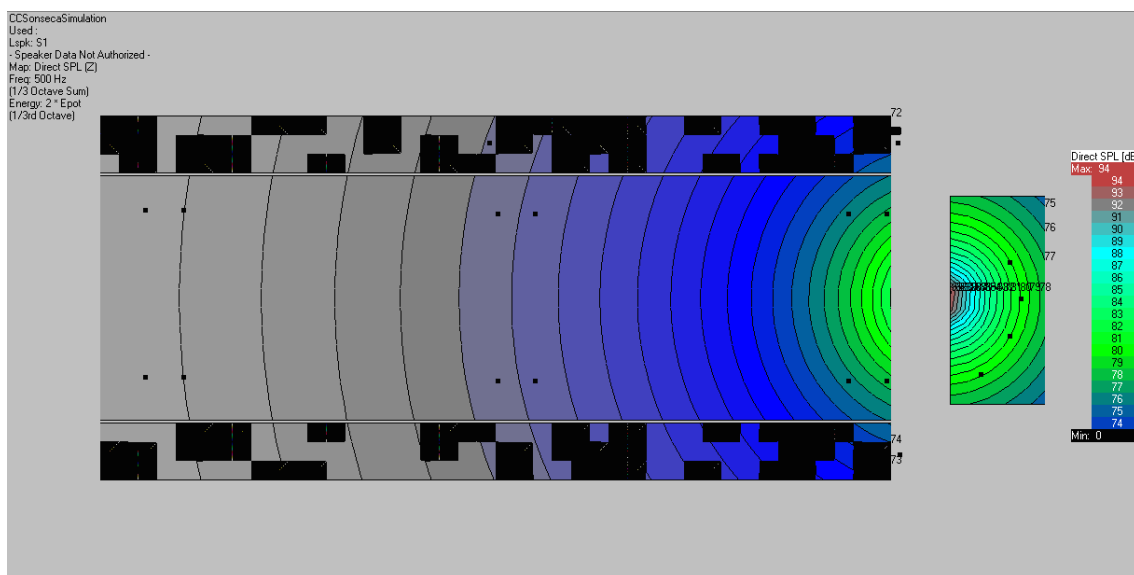


Fig 12.17 Mapa distribución SPL directo (tercio de octava de 500 Hz)

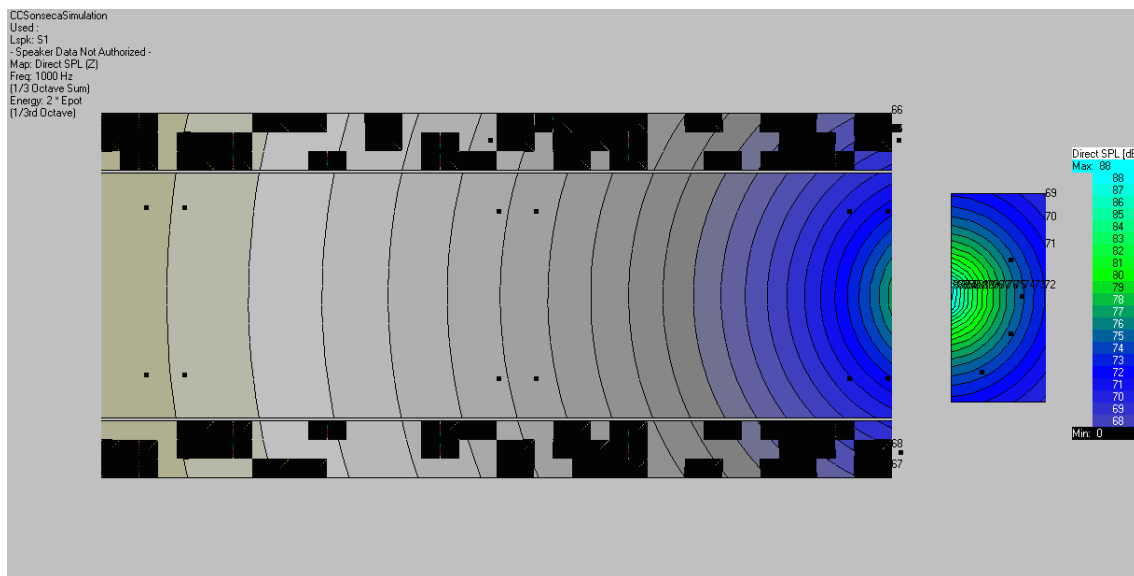


Fig 12.18 Mapa distribución SPL directo (tercio de octava de 1 kHz)

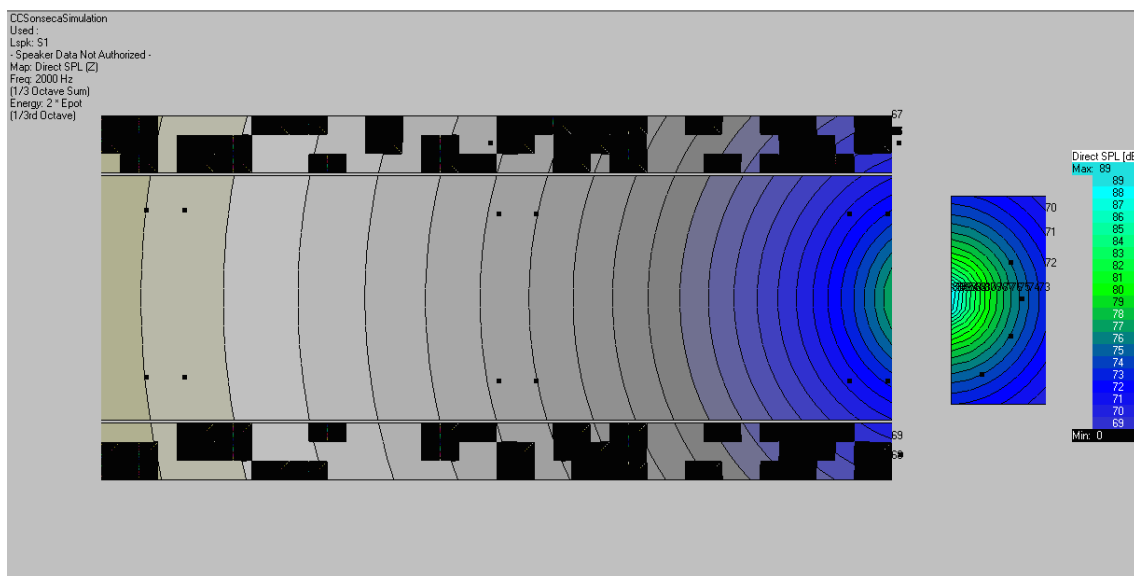


Fig 12.19 Mapa distribución SPL directo (tercio de octava de 2 kHz)

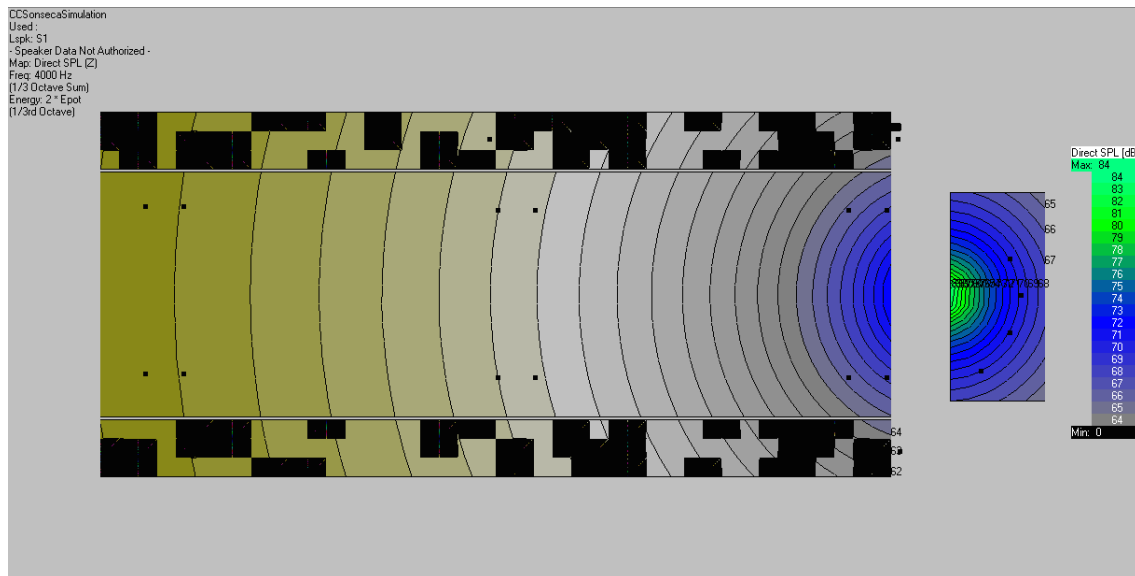


Fig 12.20 Mapa distribución SPL directo (tercio de octava de 4 kHz)

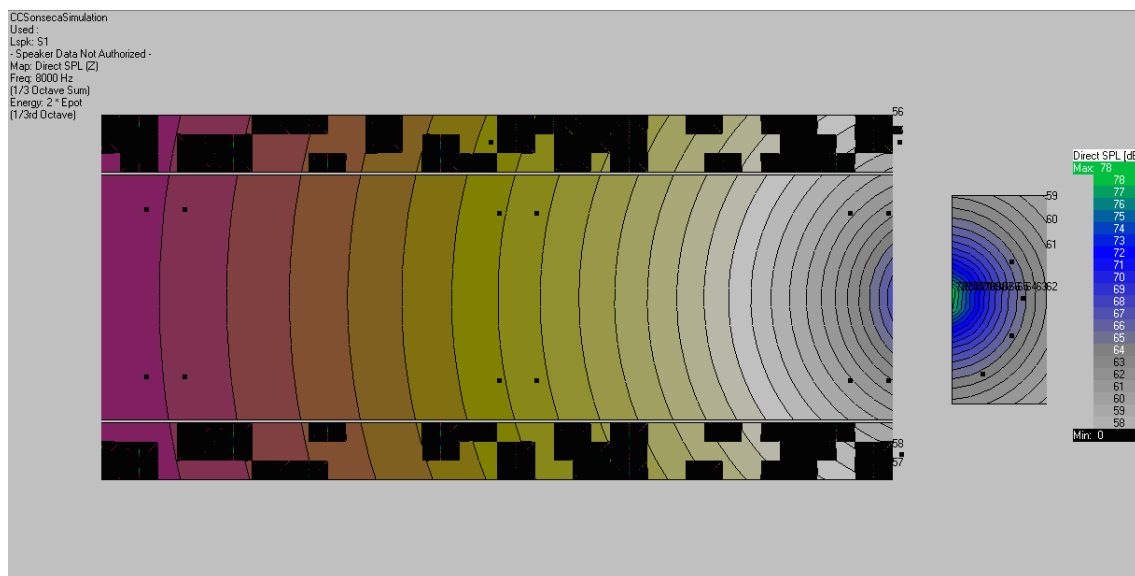


Fig 12.21 Mapa distribución SPL directo (tercio de octava de 8 kHz)

Podemos ver todos los mapas obtenidos en la simulación accediendo al siguiente enlace: http://www.tsc.uc3m.es/~azpicueta/AA12_TFG_JGR.pdf

Anexo 3. Presupuesto



Presupuesto del proyecto:

Autor	Javier García Ruiz
Departamento	Teoría de la señal y las comunicaciones
Descripción del proyecto	Estudio Acústico del Patio Auditorio Casa de la Cultura de Sonseca
Duración del proyecto	10 meses

Presupuesto total del proyecto 29.037€

Desglose del presupuesto:

- Gastos de personal:

Desarrollo del proyecto: 1 ingeniero x 1500 €/mes15000€

Ensayo de medida: 3 ingenieros x 300€/día 900€

Total de gastos: 15.900€

- Equipos:

- Simulación:

Software de simulación acústica EASE 1760€

- Ensayo:

Fuente dodecaedrica 2200€

Analizador Symphonie 3000€

Sonómetro portátil 4132€

Amplificador de potencia 1000€

Ordenador de mesa adaptado para Symphonie 1000€

Total de gastos: 13.092€

- Otros gastos:

Material oficina 30€

Desplazamientos 15€

Total de gastos: 45€

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES



TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO ACÚSTICO DE UN RECINTO AL AIRE
LIBRE: PATIO AUDITORIO CASA DE LA CULTURA
DE SONSECA

Ampliación Anexo 1 y Anexo 2

GRADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS AUDIOVISUALES

Autor: Javier García Ruiz

Tutor: Luis Antonio Azpicueta Ruiz

Ampliación Anexo 1

1. SPL medido en el ensayo.

Mapa de nivel de presión sonora			Frecuencia: 100HZ																	
A	B	C	D	E	F	G	H													
			82,0		80,2															
	78,8		Escenario		79,5															
PASILLO_1							PASILLO_2													
	79,9	FUENTE				78,6														
1	71,9	79,9	78,8	78,5	76,1	75,5	74,8	69,6	escaleras	Valor Máxim	82,0	Codigo colores								
2	73,3	78,4	76,4	76,2	78,7	78,1	76,1	74,0		Valor Mínim	66,5	80,2-83,0								
3	74,6	76,8	76,7	78,4	76,7	78,6	79,0	74,2				77,4-80,2								
4	77,0	75,7	76,3	75,9	75,7	77,0	76,1	76,2				74,6-74,4								
5	76,5	76,1	75,9	74,4	75,4	75,4	74,8	73,9				71,8-74,6								
6	74,2	74,5	74,6	73,1	73,8	73,8	76,0	72,2				69,0-71,8								
7	74,0	71,6	73,4	73,0	74,3	73,7	74,6	72,9				66,2-69,0								
8	70,2	72,4	72,2	72,4	72,8	72,8	74,6	72,1												
9	69,2	72,8	71,9	72,6	72,0	71,7	74,9	70,7												
10	70,6	74,1	71,9	74,5	72,9	70,6	75,6	72,3												
11	71,0	71,0	72,9	74,0	71,1	71,3	75,1	71,7												
12	71,9	73,1	73,1	72,5	70,8	74,6	73,9	73,1												
13	72,0	73,3	73,1	72,3	69,5	74,7	70,5	71,3												
14	72,0	72,5	74,0	73,7	68,6	75,0	72,2	68,7												
15	69,6	69,9	73,6	73,2	68,8	74,2	71,2	68,1												
16	68,6	71,5	70,1	73,6	68,7	71,8	68,2	69,8												
17	69,4	71,4	72,2	71,8	68,2	72,0	67,4	69,9												
18	70,9	68,4	69,0	68,8	71,0	71,5	68,0	70,4												
19	70,0							71,9												
20	66,5																			

Mapa de nivel de presión sonora				Frecuencia: 160HZ																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									</
---------------------------------	--	--	--	-------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	----

Mapa de nivel de presión sonora				Frecuencia: 250HZ										
	A	B	C	D	E	F	G	H						
			88,1	90,2		86,7								
		88,2		Escenario		85,4								
	PASILLO_1											PASILLO_2		
		89,8		FUENTE		88,8								Codigo colores
1	82,8	87,5	87,6	88,7	87,7	87,9	88,7	80,6	escaleras	Valor Maxim	90,2			90,0-93,0
2	82,8	85,3	86,7	88,2	87,6	87,4	84,1	82,7		Valor Minim	75,1			87,0-90,0
3	82,0	83,7	83,7	85,5	84,0	83,6	81,4	81,3						84,0-87,0
4	82,5	82,2	81,8	81,0	82,2	81,4	80,9	81,4						81,0-84,0
5	80,5	80,7	81,2	78,1	80,2	82,6	82,0	79,9						78,0-81,0
6	80,0	79,2	81,3	81,2	81,0	82,0	79,9	81,4						75,0-78,0
7	80,2	80,5	80,5	79,9	78,1	81,4	79,0	80,7						
8	79,1	82,8	82,0	77,7	77,1	80,6	79,3	80,6						
9	82,9	78,8	79,1	80,1	79,8	81,5	79,7	79,5						
10	79,4	80,0	78,3	79,7	80,1	80,6	79,9	78,7						
11	80,1	78,0	78,5	78,8	80,2	79,6	79,9	81,5						
12	78,3	81,0	79,3	78,0	77,8	80,1	80,7	79,1						
13	78,8	79,1	78,6	78,3	78,8	77,8	79,2	78,4						
14	78,8	79,4	78,6	77,2	78,9	77,4	78,2	76,7						
15	79,4	80,9	78,0	77,4	78,2	78,0	77,8	79,1						
16	78,1	79,5	75,2	76,9	78,1	75,1	77,6	77,4						
17	76,7	79,4	78,0	77,4	79,4	78,3	77,6	78,0						
18	76,5	77,6	76,1	79,5	77,9	76,9	77,0	77,3						
19	77,2							76,9						
20	76,6													

Mapa de nivel de presión sonora				Frecuencia: 400HZ																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																															
---------------------------------	--	--	--	-------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Mapa de nivel de presión sonora				Frecuencia: 630HZ																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
---------------------------------	--	--	--	-------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Mapa de nivel de presión sonora				Frecuencia: 1kHz															
	A	B	C	D	E	F	G	H											
			79,9	80,1		79,7													
		79,5		Escenario		80,5													
	PASILLO_1							PASILLO_2											
		81,6		FUENTE				79,5											
1	76,0	77,3	78,3	80,0	79,2	78,2	77,7	76,6	escaleras	Valor Máxim	81,6								
2	75,5	77,4	78,3	78,2	77,4	77,5	76,2	75,6		Valor Mínim	65,5								
3	73,9	75,6	76,3	77,0	76,2	74,2	76,1	75,5											
4	75,4	75,2	76,3	75,2	75,9	75,6	74,5	73,2											
5	75,3	73,9	75,0	75,1	74,2	74,1	73,2	73,6											
6	74,9	72,0	72,6	73,5	72,0	73,8	72,6	72,3											
7	71,8	72,4	73,6	71,8	71,6	72,6	72,4	72,0											
8	72,5	72,5	72,3	71,8	72,5	73,3	72,4	71,8											
9	70,9	71,8	72,2	70,9	72,1	72,9	71,5	72,3											
10	70,4	71,1	72,7	71,6	71,8	72,2	71,3	71,9											
11	70,1	70,3	70,0	69,8	70,2	70,5	70,1	69,0											
12	70,0	69,1	68,4	68,7	69,1	69,4	68,7	69,7											
13	68,9	67,6	68,2	68,0	68,4	68,8	68,5	68,4											
14	67,7	67,8	66,3	67,9	66,9	68,3	68,3	67,4											
15	68,3	68,0	67,1	67,7	66,3	67,0	66,6	66,7											
16	66,9	66,6	65,5	67,2	66,3	66,8	66,4	68,2											
17	68,2	67,0	67,0	66,9	67,0	66,5	66,7	66,5											
18	66,6	66,9	67,2	67,2	66,4	66,6	66,2	66,5											
19	66,6							67,0											
20	67,2																		

Codigo colores	
79-82	
77-79	
74-77	
71-74	
68-71	
65-68	

Fig. 1.11 SPL medido 1 kHz

Mapa de nivel de presión sonora				Frecuencia: 1,25kHz								
A	B	C	D	E	F	G	H					
		80,7	80,0		79,5							
	78,6		Escenario			78,9						
PASILLO_1							PASILLO_2					
	80,1		FUENTE			78,3						
1	74,3	76,2	78,1	77,9	77,4	75,8	76,9	75,3	escaleras	Valor Máxim	80,7	Codigo colores
2	73,2	76,4	76,5	76,5	77,4	75,1	75,0	74,4		Valor Minim	65,1	78-81
3	74,8	77,2	74,7	73,9	74,7	74,8	73,6	72,6		75-78		
4	75,2	74,5	73,4	72,7	73,4	72,7	72,1	71,8		72-78		
5	74,7	74,0	73,0	71,9	72,1	73,0	72,2	71,5		69-72		
6	74,0	73,1	72,0	72,7	71,9	71,6	72,4	70,4		66-69		
7	73,1	71,4	72,0	70,6	71,0	70,8	71,0	71,2		63-66		
8	72,1	70,7	69,4	70,4	70,4	69,0	70,7	71,5				
9	71,6	70,2	69,3	70,3	70,2	69,5	69,3	69,8				
10	69,8	70,0	69,8	68,8	69,1	69,9	70,5	69,0				
11	69,8	68,7	68,1	68,7	69,1	69,7	69,3	69,1				
12	67,6	68,8	68,1	68,5	67,5	68,1	69,0	68,4				
13	67,8	66,8	67,5	67,4	68,2	67,9	67,7	67,5				
14	67,3	66,1	67,4	67,2	67,1	67,3	67,7	67,4				
15	65,9	66,0	66,0	66,1	66,1	66,5	67,6	67,4				
16	66,0	65,7	65,4	65,4	65,8	66,4	66,0	65,9				
17	65,9	65,3	65,8	65,6	65,8	65,4	66,1	65,6				
18	65,7	65,6	65,1	65,3	65,8	65,3	65,6	65,6				
19	65,3							65,8				
20	65,7											

Mapa de nivel de presión sonora			Frecuencia: 1,6KHZ											
	A	B	C	D	E	F	G	H						
			83,5	80,7			81,6							
		81,6		Escenario			81,1							
	PASILLO_1							PASILLO_2						
		82,5		FUENTE				82,1						Codigo colores
1	76,5	77,5	80,9	80,3	80,2	80,4	78,4	78,0	escaleras	Valor Maxim	83,5		81-84	
2	76,9	80,1	80,0	79,0	79,4	78,7	78,2	76,7		Valor Minim	67,9		78-81	
3	76,9	79,7	77,2	76,8	77,0	77,0	75,6	76,5					75-78	
4	77,3	79,1	76,0	76,1	75,4	76,6	75,0	74,9					72-75	
5	77,6	75,6	75,1	74,7	74,4	73,5	73,1	73,6					69-72	
6	77,5	77,2	73,8	73,7	72,6	74,7	74,2	74,5					66-69	
7	74,8	74,8	74,2	73,4	73,3	74,3	74,9	72,7						
8	74,6	73,1	72,7	72,7	72,9	73,5	73,6	73,6						
9	72,8	73,0	71,6	71,4	72,7	71,8	72,0	73,2						
10	73,2	70,9	71,3	73,1	72,0	72,4	71,4	73,6						
11	71,5	70,5	71,5	71,5	71,9	72,5	71,4	73,0						
12	71,8	70,3	70,8	71,4	71,4	70,7	71,6	71,2						
13	71,8	69,8	70,1	70,4	71,2	70,8	71,9	70,7						
14	70,2	69,1	70,5	70,3	71,3	70,1	71,0	70,4						
15	68,7	68,9	69,1	70,6	69,0	70,4	69,4	69,7						
16	68,8	68,6	68,5	69,1	69,3	69,5	70,0	69,4						
17	69,3	69,1	68,9	67,9	68,9	69,4	69,2	69,1						
18	68,7	68,0	68,1	68,0	68,2	68,8	68,2	69,1						
19	68,7							69,4						
20	68,4													

Fig. 1.13 SPL medido 1,6 kHz

Mapa de nivel de presión sonora			Frecuencia: 2kHz										
A	B	C	D	E	F	G	H						
		82,3	79,5		80,4								
	82,2		Escenario			80,4							
PASILLO_1										PASILLO_2			
	79,7		FUENTE			79,5							
1	76,2	77,5	77,8	79,6	79,5	79,3	76,2	76,3	escaleras	Valor Máxim	82,3		Codigo colores
2	75,5	78,0	78,6	79,3	78,2	79,4	77,6	74,4		Valor Minim	66,3		80-83
3	75,0	77,5	75,0	77,1	75,5	76,1	76,7	75,1					77-80
4	76,2	75,5	74,6	76,1	74,1	75,1	74,7	75,8					74-77
5	74,2	74,0	74,0	74,0	73,9	74,0	73,2	72,3					71-74
6	74,9	74,1	74,0	74,3	72,9	74,0	73,0	75,4					68-71
7	72,5	72,1	71,8	72,3	71,4	71,6	73,3	72,4					65-68
8	72,7	71,4	72,7	71,9	72,0	73,3	72,4	72,8					
9	71,0	71,9	72,7	71,8	72,0	71,0	71,5	71,4					
10	70,9	70,6	71,6	71,7	70,9	70,1	70,8	70,8					
11	70,1	69,3	69,8	68,2	69,6	69,3	69,7	71,2					
12	69,5	68,7	68,6	68,5	69,0	68,4	68,8	69,0					
13	68,7	68,3	68,6	68,1	68,7	68,1	68,7	68,3					
14	67,6	68,2	68,4	68,3	68,3	67,6	68,6	67,5					
15	67,6	68,1	68,6	68,1	67,7	68,0	68,3	68,7					
16	67,4	67,6	67,0	67,6	67,1	67,1	67,7	67,4					
17	66,3	67,6	67,4	66,9	68,0	67,1	67,1	66,9					
18	66,8	67,1	67,3	66,8	66,6	66,6	67,2	67,1					
19	66,5							67,2					
20	67,0												

Fig. 1.14 SPL medido 2 kHz

Mapa de nivel de presión sonora			Frecuencia: 2,5kHz										
A	B	C	D	E	F	G	H						
			79,6			78,7							
	80,6		Escenario			79,6							
PASILLO_1								PASILLO_2					
	78,4		FUENTE			78,6							Codigo colores
1	75,6	76,4	76,0	80,3	78,1	78,2	75,3	78,2	escaleras	Valor Máxim	82,0		79-82
2	74,7	77,1	77,0	79,1	77,6	78,1	76,7	73,4		Valor Mínim	64,5		76-79
3	73,7	76,3	74,4	77,3	75,2	74,6	76,4	74,0					73-76
4	75,8	72,7	74,1	75,9	73,6	73,6	73,5	74,5					70-73
5	71,9	72,5	73,9	74,6	73,4	73,4	72,8	72,7					67-70
6	72,4	72,9	73,7	73,2	72,0	72,5	72,0	73,0					64-67
7	70,6	71,1	71,1	71,3	70,2	70,9	70,8	70,4					
8	70,9	71,2	72,2	71,4	69,8	71,4	69,5	72,2					
9	68,8	70,8	70,3	69,9	70,8	69,7	68,7	70,7					
10	69,0	69,5	69,1	69,7	69,2	69,1	69,2	69,3					
11	68,4	69,2	69,2	68,6	68,4	67,7	68,0	69,0					
12	68,2	68,5	68,2	67,9	67,0	67,0	67,5	67,8					
13	67,7	66,6	67,1	67,1	66,3	66,0	66,8	66,9					
14	66,5	66,7	66,5	65,5	66,1	65,6	66,4	66,2					
15	66,6	66,4	65,3	64,5	65,1	65,9	65,5	66,0					
16	66,0	65,2	65,1	65,2	65,0	65,3	65,2	66,0					
17	65,6	65,7	66,3	65,1	65,4	65,0	65,1	65,8					
18	65,2	65,5	65,3	65,5	65,1	64,8	65,1	65,7					
19	65,8							65,7					
20	65,3												

Fig. 1.15 SPL medido 2,5 kHz

Mapa de nivel de presión sonora			Frecuencia: 3,15kHz												
	A	B	C	D	E	F	G	H							
				76,9		78,6									
		78,6		Escenario		78,1									
	PASILLO_1								PASILLO_2						
		77,2		FUENTE		76,5									Codigo colores
1	74,0	74,2	75,7	77,4	77,5	75,4	73,1	74,6	escaleras	Valor Máxim	79,6				77-80
2	72,1	75,9	76,3	78,3	75,7	77,4	74,5	71,9		Valor Mínim	62,2				
3	72,0	75,2	71,8	76,3	72,6	73,6	75,3	72,0							71-74
4	72,9	71,7	72,8	75,3	72,7	71,4	72,9	71,1							68-71
5	71,1	71,4	72,2	74,0	72,5	71,7	70,3	69,5							65-68
6	72,4	70,6	71,8	72,0	70,3	70,9	70,3	71,4							62-65
7	68,7	69,6	70,5	71,7	69,1	69,3	69,2	69,5							
8	68,8	69,4	69,6	69,5	68,8	69,9	68,2	69,9							
9	67,5	68,2	69,2	68,9	67,8	67,6	67,2	68,5							
10	67,5	67,2	68,2	68,7	67,3	67,4	67,9	67,8							
11	66,7	66,6	66,4	65,7	66,1	66,2	66,3	67,0							
12	66,2	66,1	66,0	64,9	65,6	65,3	65,0	65,0							
13	65,7	65,1	65,2	65,5	64,7	63,9	65,1	65,1							
14	64,2	64,7	65,0	64,3	64,4	63,7	64,0	64,0							
15	63,7	64,6	63,6	63,9	63,5	63,7	63,6	63,6							
16	62,9	63,6	62,8	62,9	63,2	64,0	63,2	63,5							
17	63,4	63,3	63,7	62,9	62,9	63,0	62,9	63,3							
18	63,0	62,7	62,9	62,8	62,2	62,6	62,8	63,1							
19	62,7							63,0							
20	62,9														

Fig. 1.16 SPL medido 3,15 kHz

Mapa de nivel de presión sonora				Frecuencia: 6,3kHz											

Mapa de nivel de presión sonora				Frecuencia: 10KHZ										
	A	B	C	D	E	F	G	H						
			59,2	57,5		57,5								
		55,9		Escenario				54,2						
	PASILLO_1								PASILLO_2					
		57,9		FUENTE				57,2						
1	46,5	52,6	56,5	56,8	56,3	49,4	52,6	49,0	escaleras	Valor Máxim	59,2	Codigo colores		
2	48,3	55,1	54,7	50,8	55,8	52,4	48,4	48,0		Valor Minim	30,9	55-60		
3	50,8	54,8	51,2	50,8	51,5	49,5	46,8	46,7					50-55	
4	51,4	51,6	49,6	48,3	49,3	49,5	48,0	44,8					45-50	
5	46,7	51,1	45,4	47,7	49,0	49,3	47,5	42,0					40-45	
6	49,4	47,5	45,3	45,2	46,4	47,5	46,4	44,8					35-40	
7	42,3	47,2	45,5	43,6	44,1	45,6	44,4	39,9					30-35	
8	46,7	43,1	43,7	42,8	42,1	45,4	44,4	45,0						
9	41,6	41,6	42,7	40,6	42,0	43,3	43,1	40,1						
10	44,6	42,0	41,4	41,1	41,9	42,8	43,2	43,0						
11	39,7	39,1	39,1	38,6	40,5	41,2	41,2	40,0						
12	38,4	37,7	37,3	37,5	40,0	39,3	41,1	38,4						
13	36,5	36,6	36,4	37,0	37,5	38,7	39,7	36,9						
14	36,1	36,4	35,3	35,1	36,7	37,0	38,3	34,5						
15	34,2	35,6	35,4	33,5	35,6	36,1	37,8	34,5						
16	33,0	35,3	32,9	33,3	34,3	35,3	35,7	34,7						
17	33,6	33,9	33,0	32,7	33,7	34,2	34,4	33,6						
18	32,0	32,5	30,9	32,7	32,9	33,2	32,9	33,3						
19	31,8							32,0						
20	31,8													

Fig. 1.21 SPL medido 10 kHz

2. T60 promediado

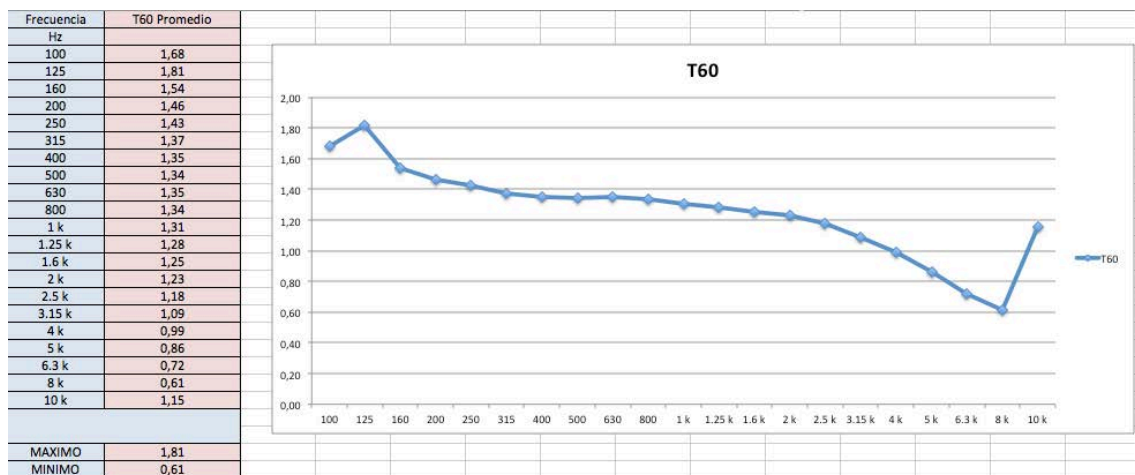


Fig. 2.1 T60 promediado de las medidas tomadas en el ensayo

Ampliación Anexo 2

1. SPL

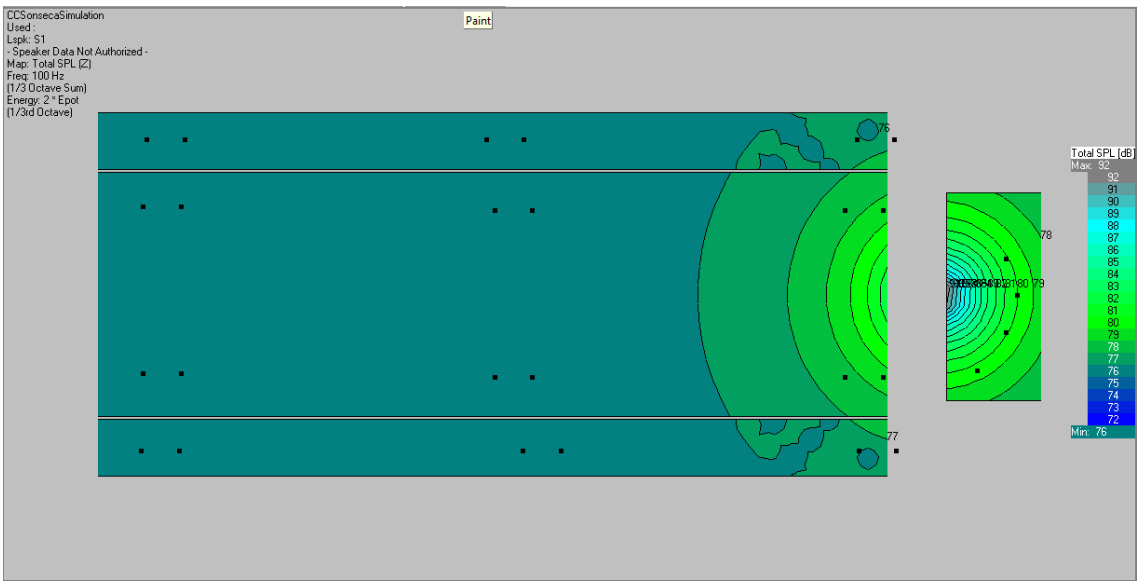


Fig. 1.1 Mapping SPL 100 Hz

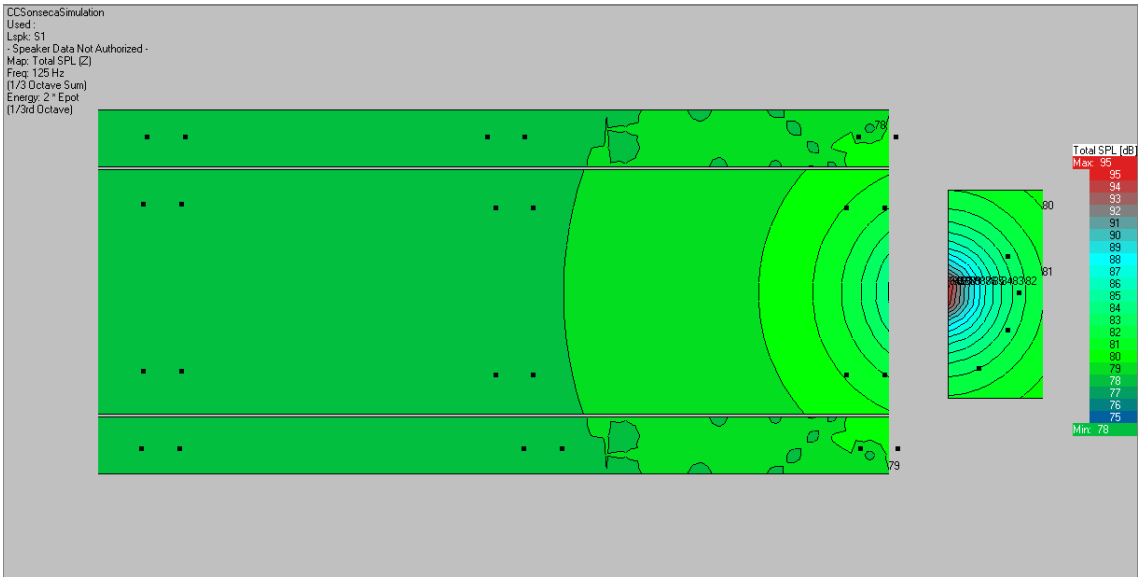


Fig. 1.2 Mapping SPL 125 Hz

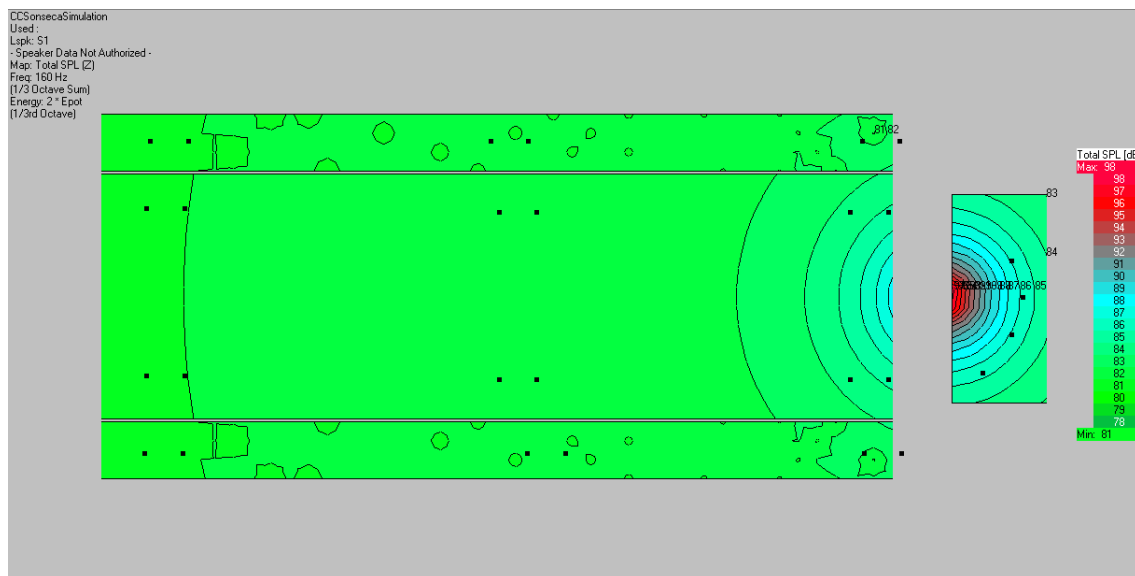


Fig. 1.3 Mapping SPL 160 Hz

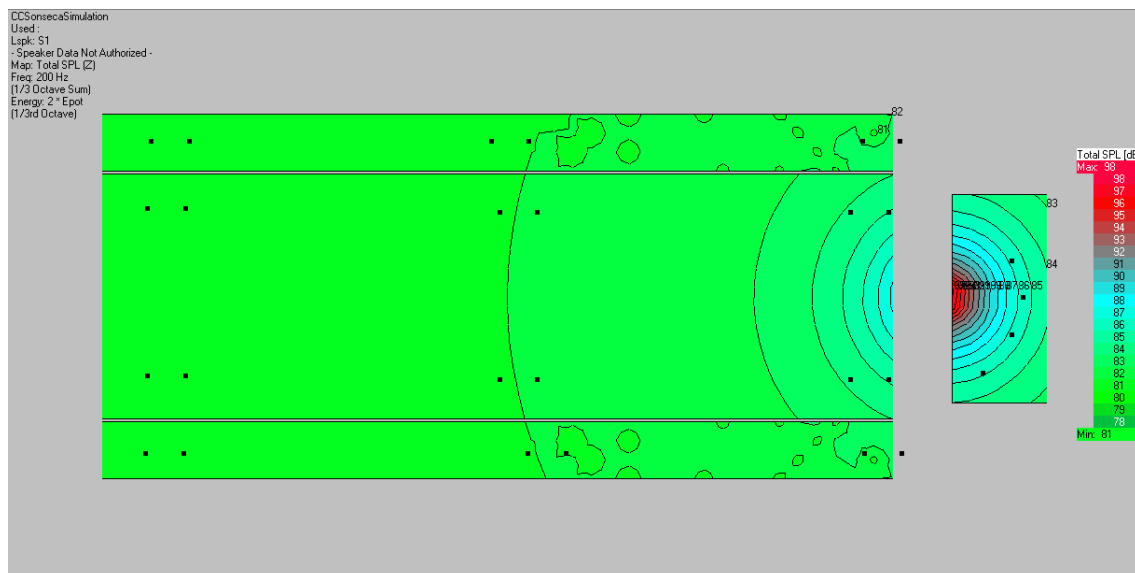


Fig. 1.4 Mapping SPL 200 Hz

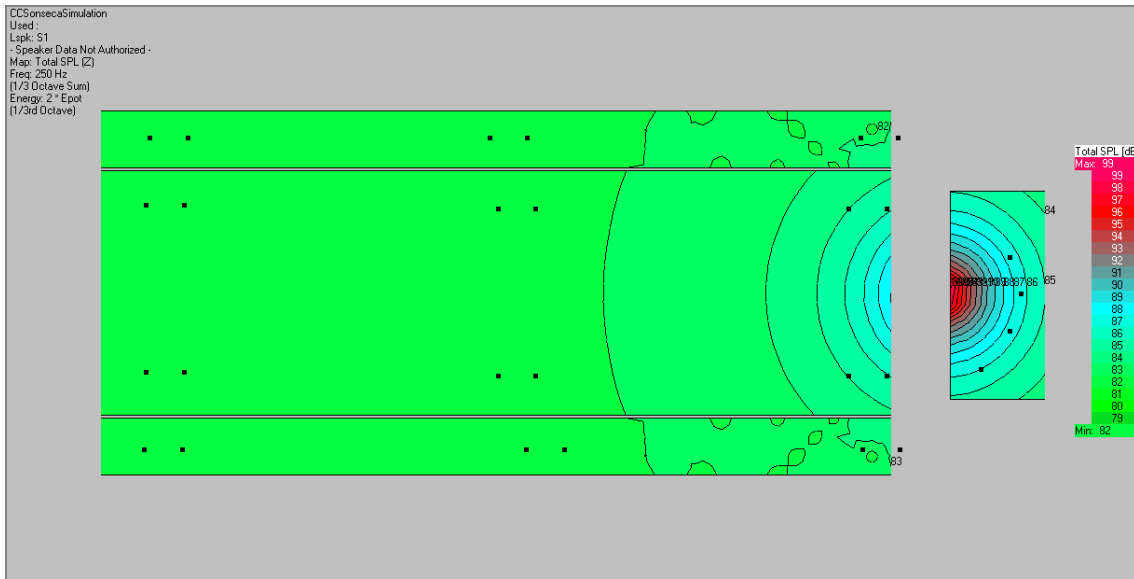


Fig. 1.5 Mapping SPL 250 Hz

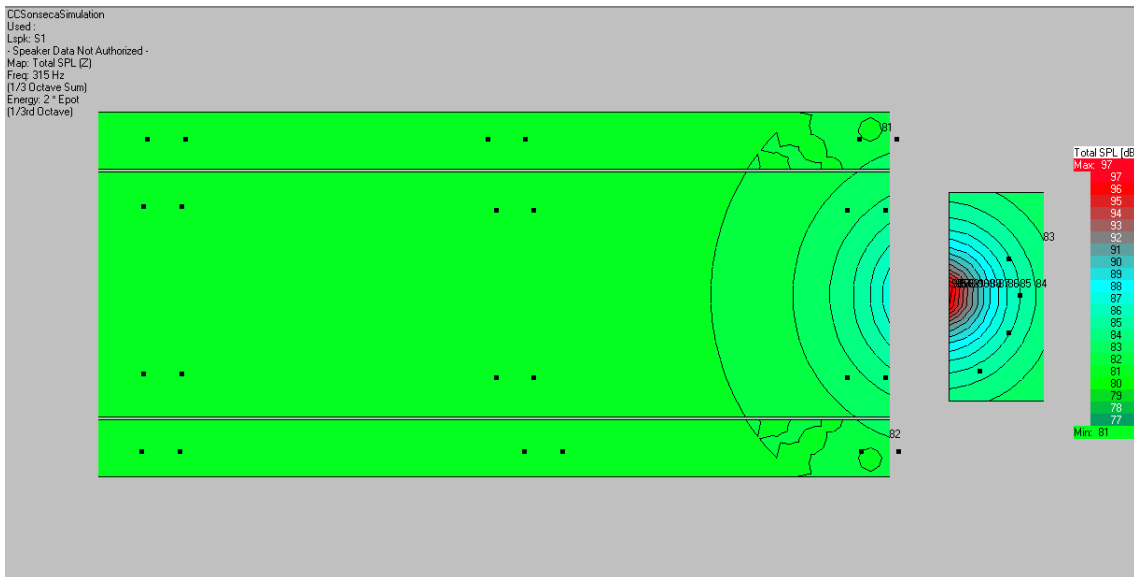


Fig. 1.6 Mapping SPL 315 Hz

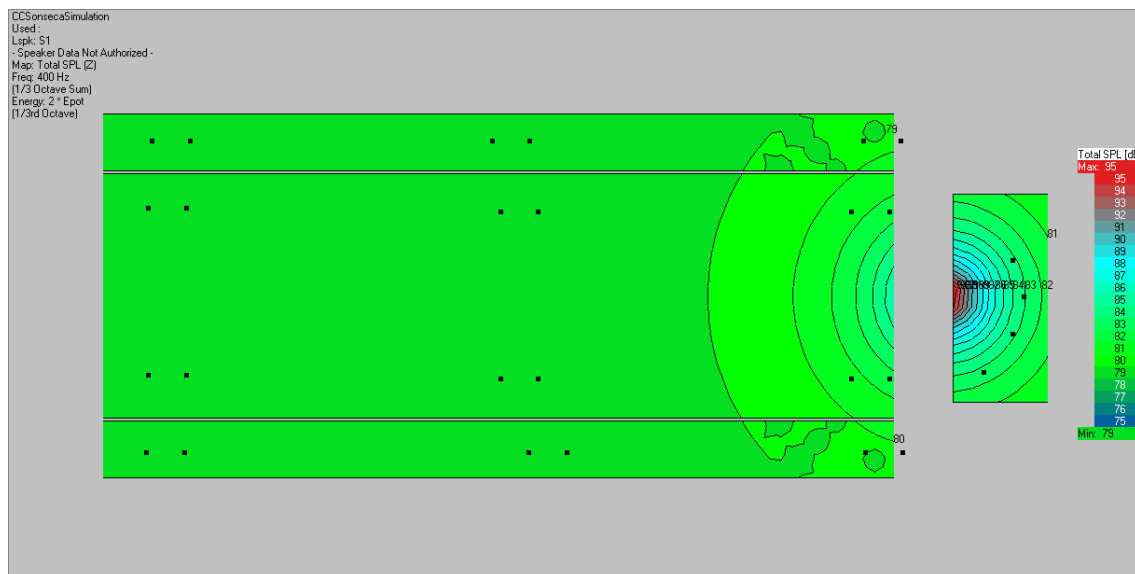


Fig. 1.7 Mapping SPL 400 Hz

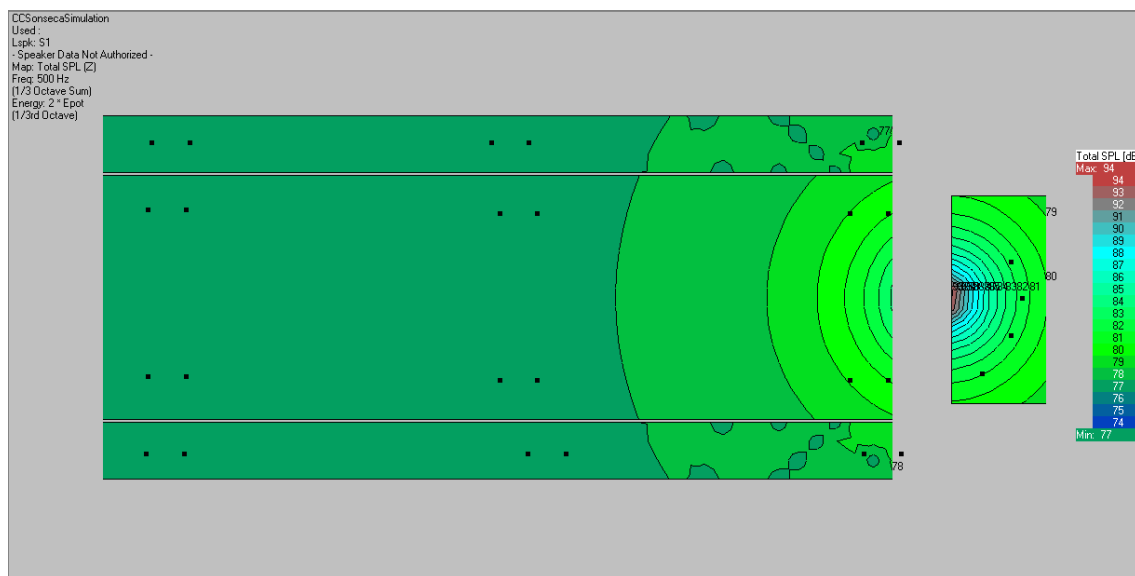


Fig. 1.8 Mapping SPL 500 Hz

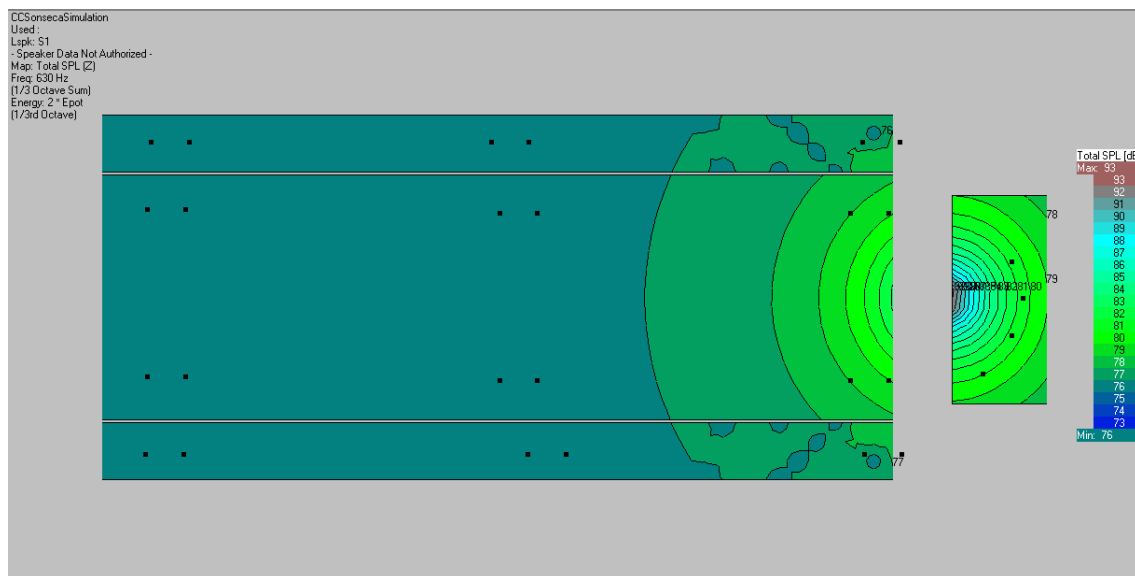


Fig. 1.9 Mapping SPL 630 Hz

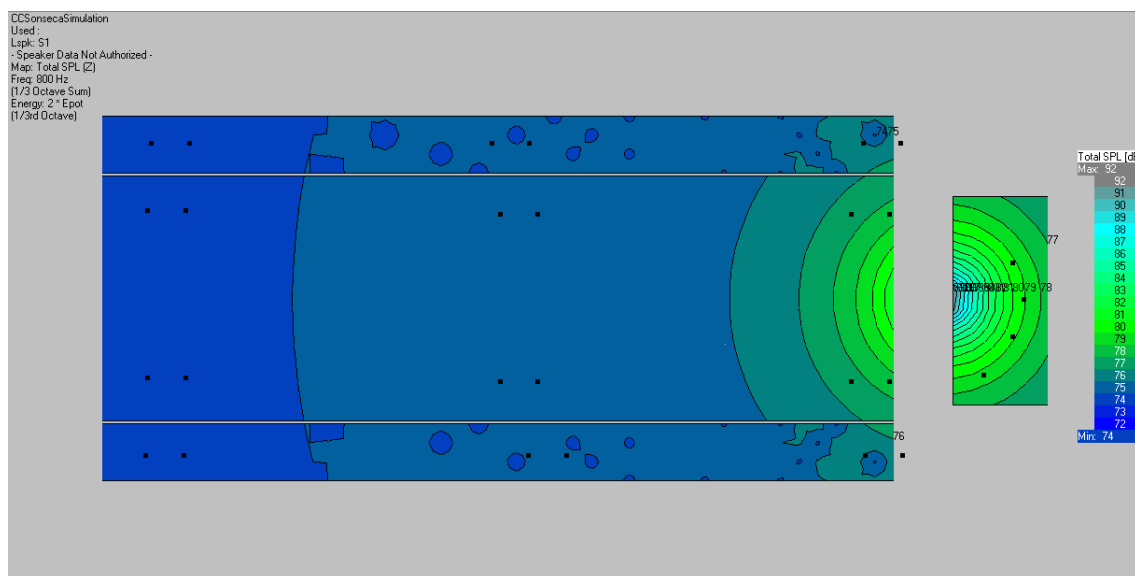


Fig. 1.10 Mapping SPL 800 Hz

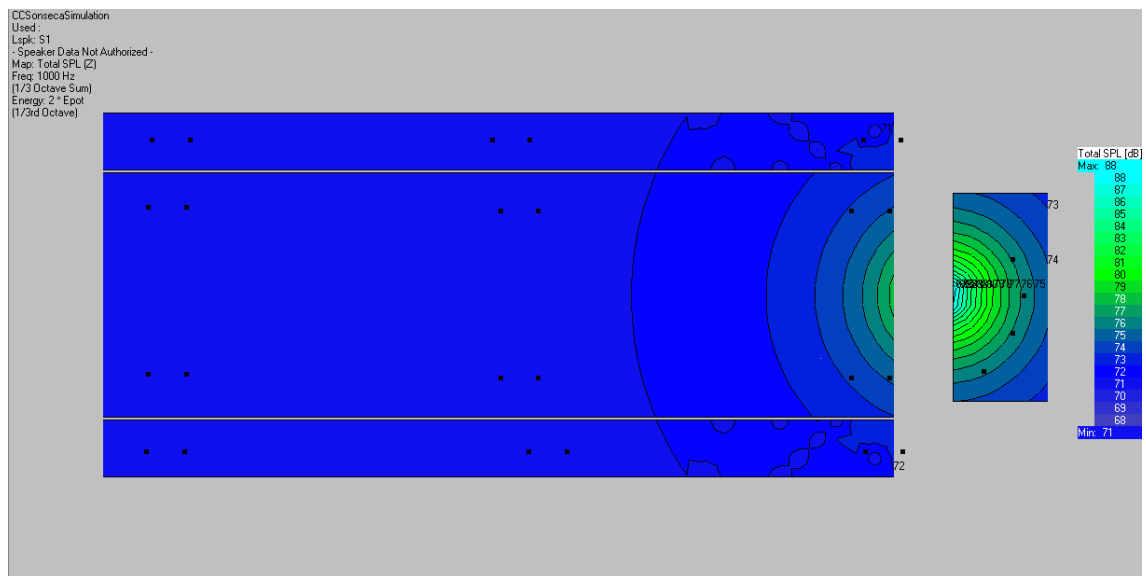


Fig. 1.11 Mapping SPL 1000 Hz

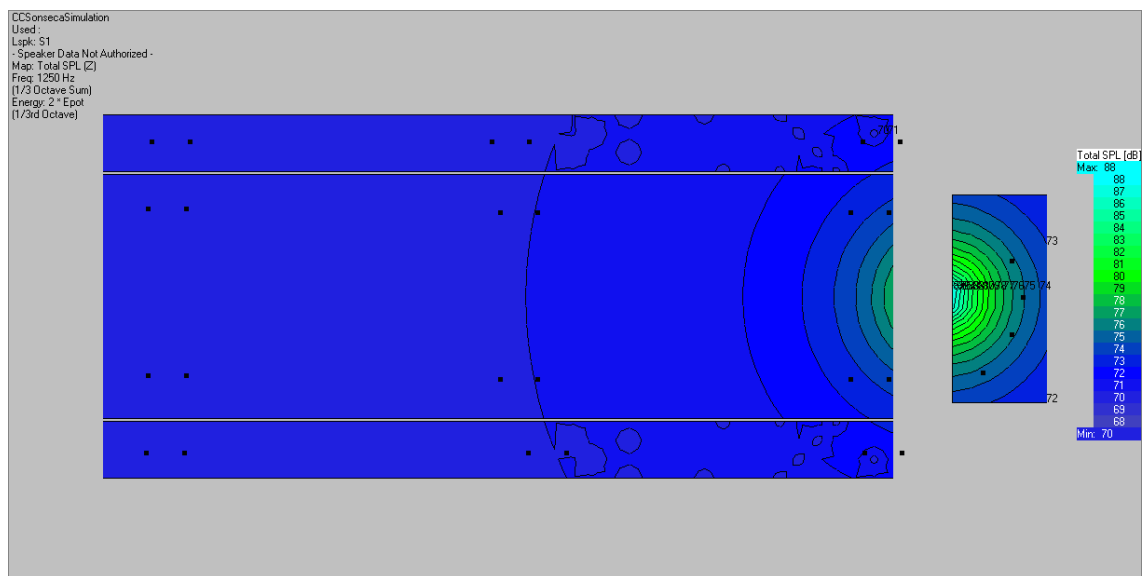


Fig. 1.12 Mapping SPL 1250 Hz

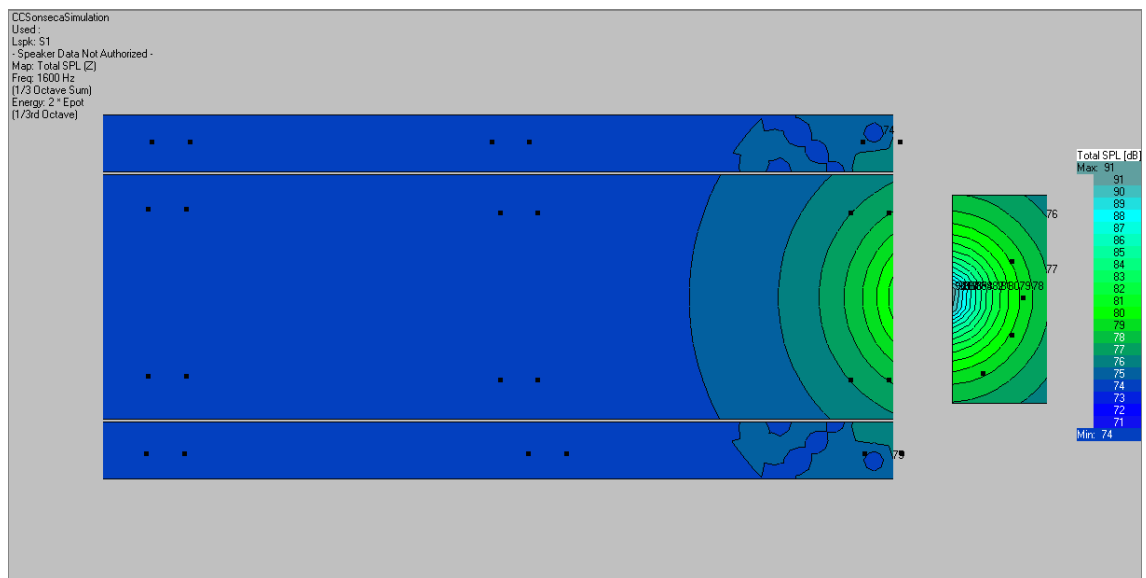


Fig. 1.3 Mapping SPL 1600 Hz

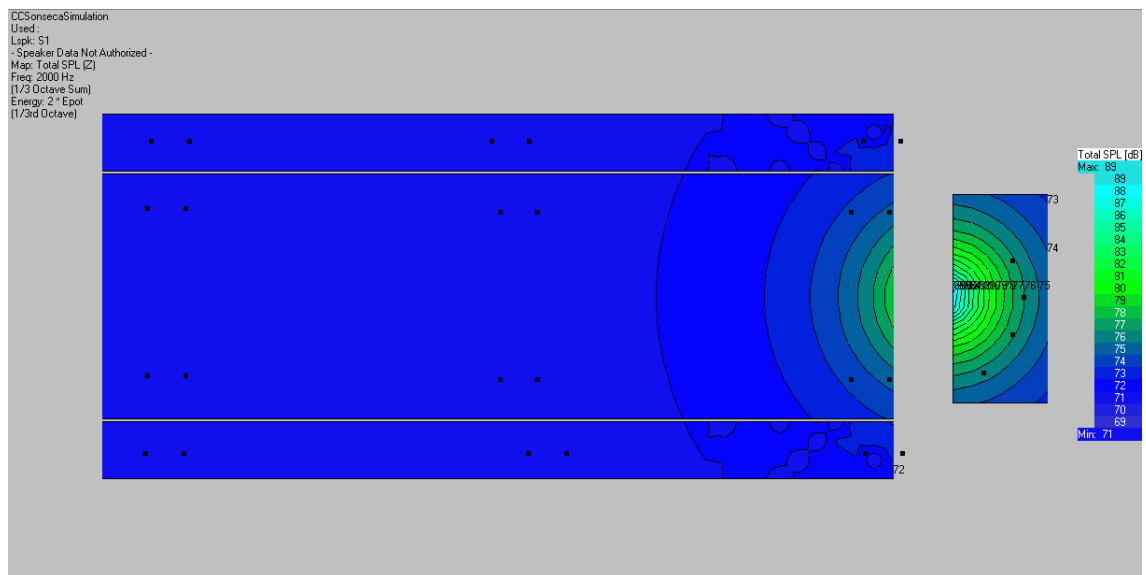


Fig. 1.14 Mapping SPL 2000 Hz

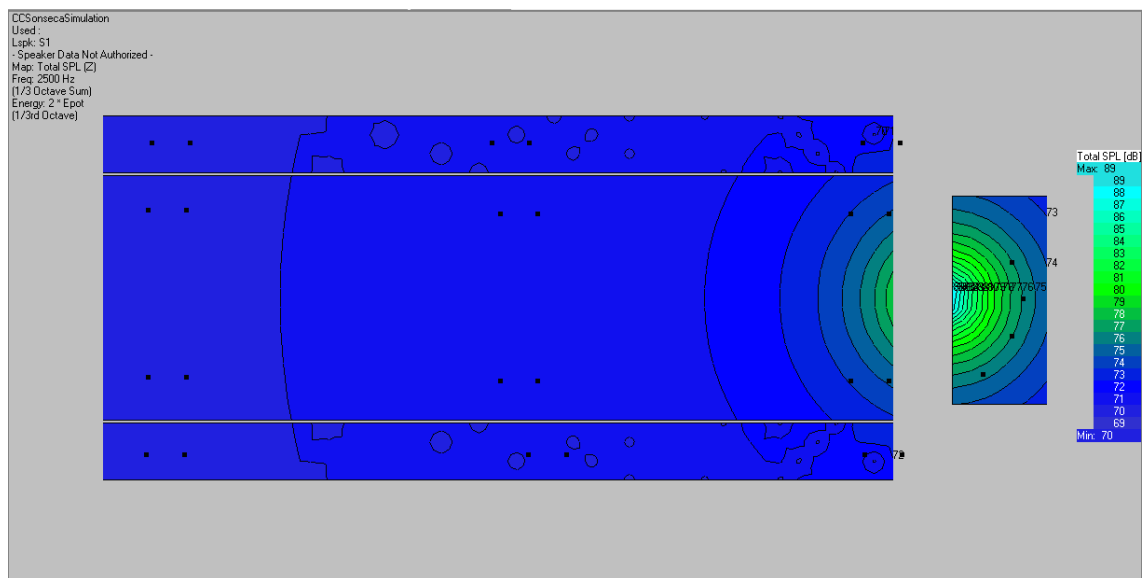


Fig. 1.15 Mapping SPL 2500 Hz

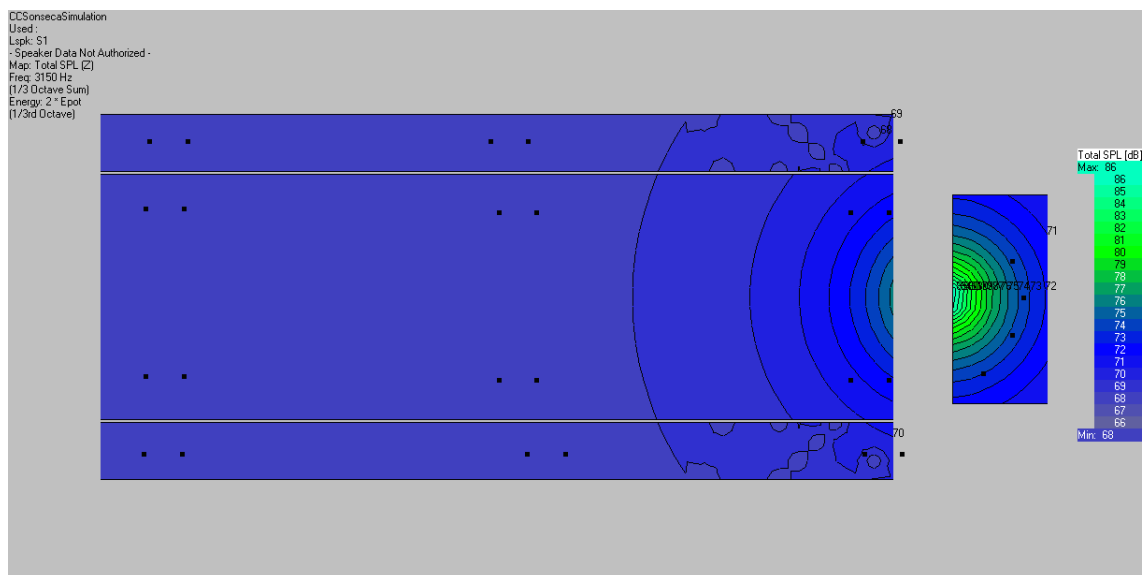


Fig. 1.16 Mapping SPL 3150 Hz

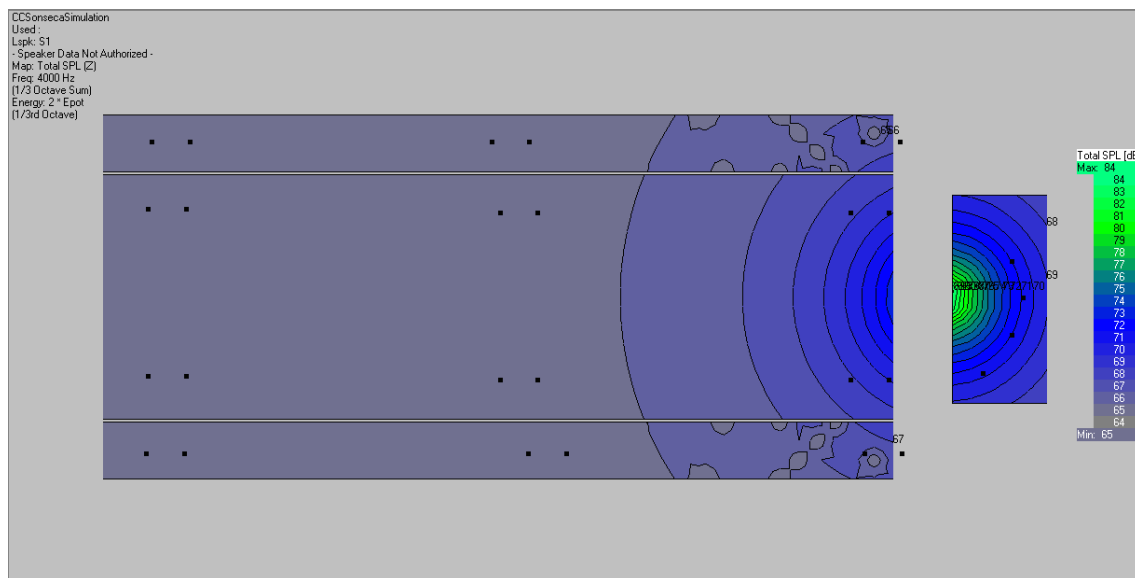


Fig. 1.17 Mapping SPL 4000 Hz

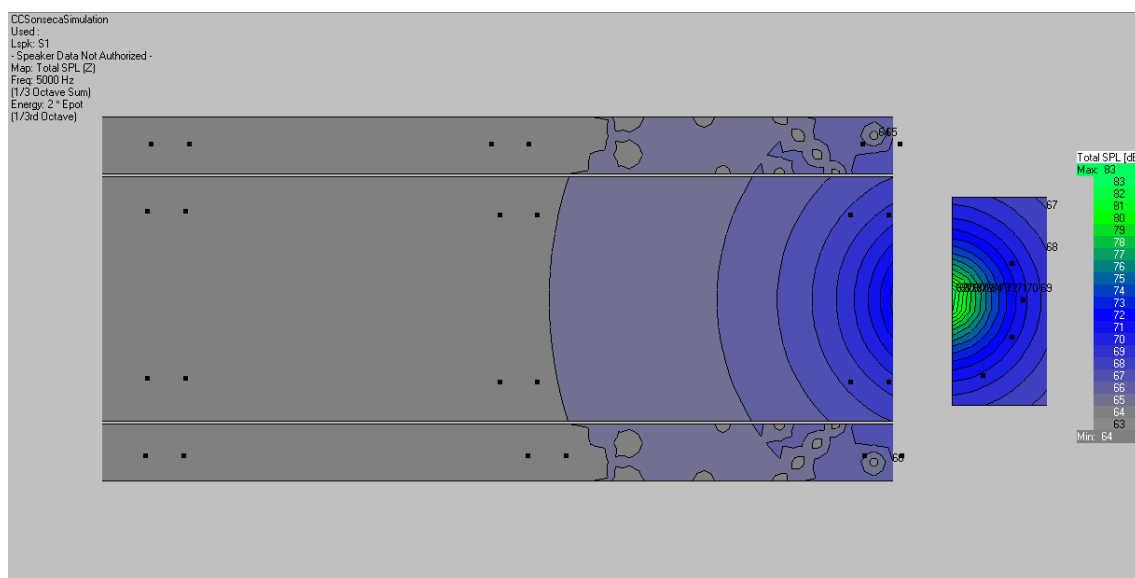


Fig. 1.18 Mapping SPL 5000 Hz

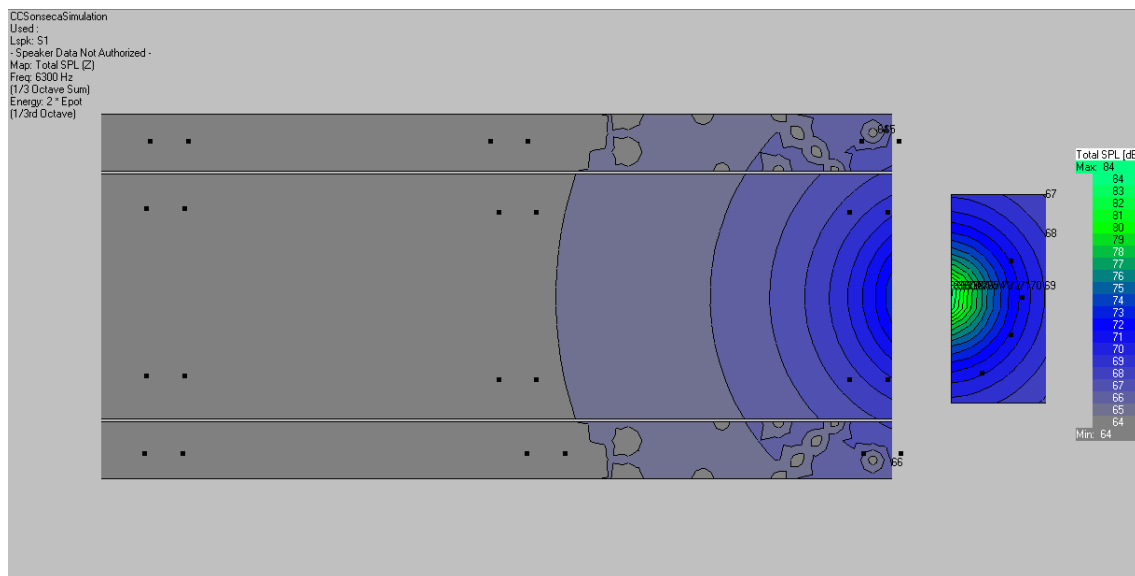


Fig. 1.19 Mapping SPL 6300 Hz

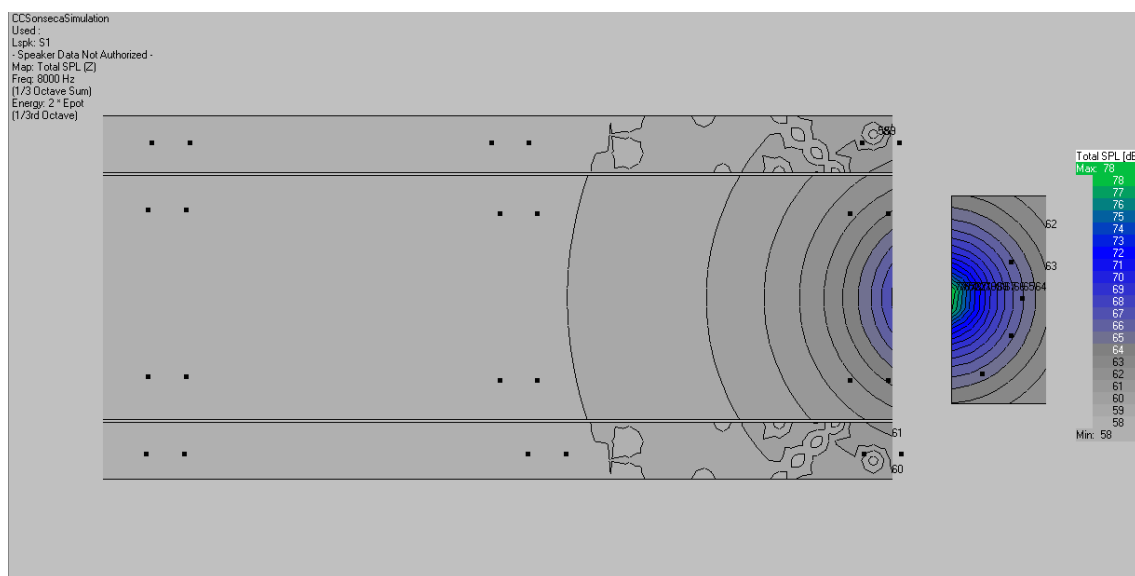
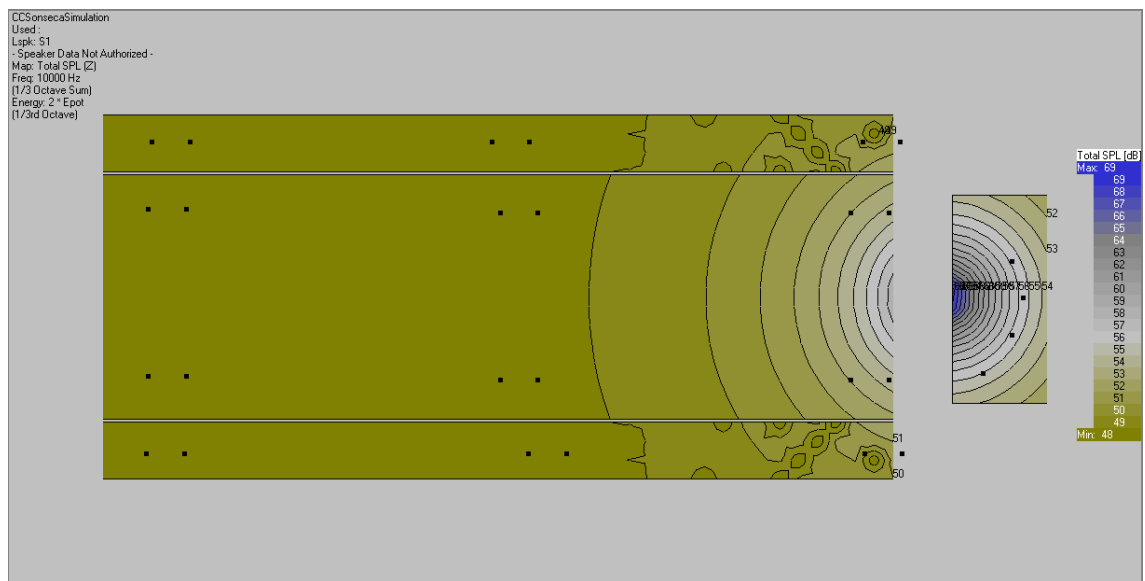


Fig. 1.20 Mapping SPL 8000 Hz



2. SPL directo

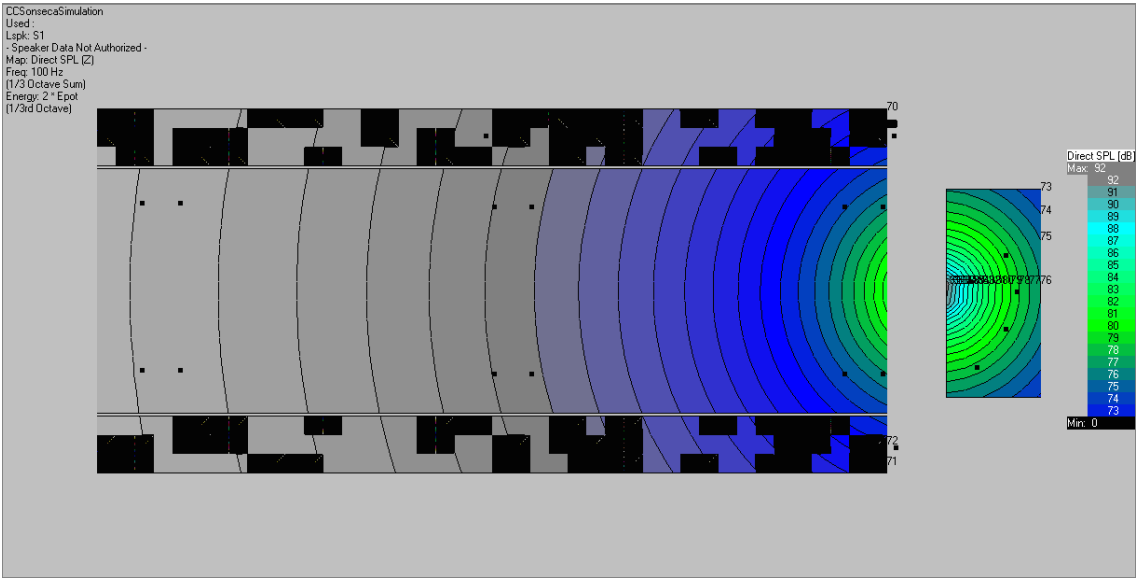


Fig. 2.1 Mapping direct SPL 100 Hz

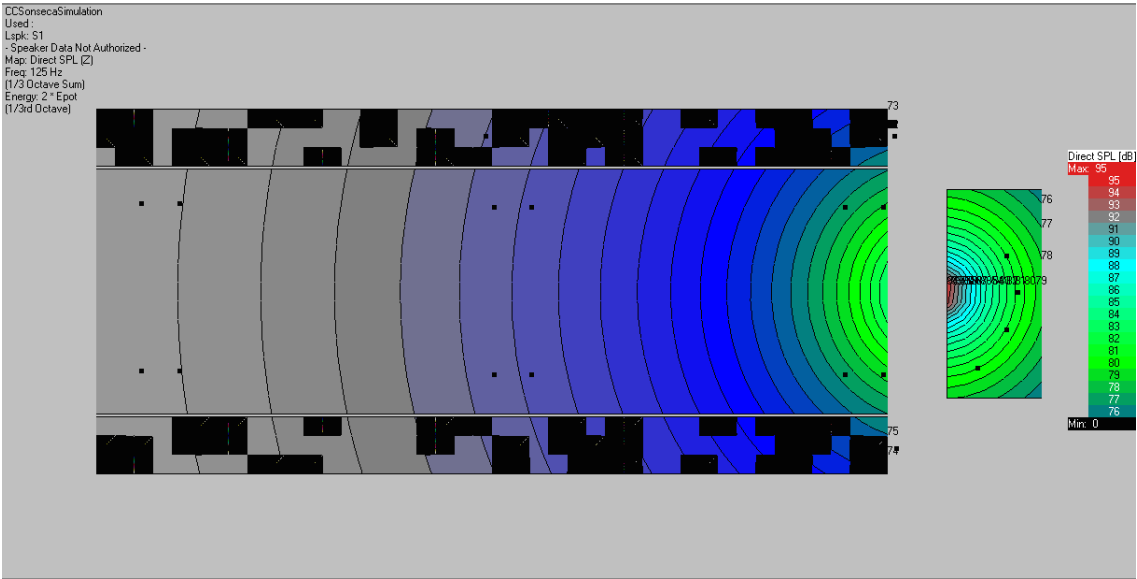


Fig. 2.2 Mapping direct SPL 125 Hz

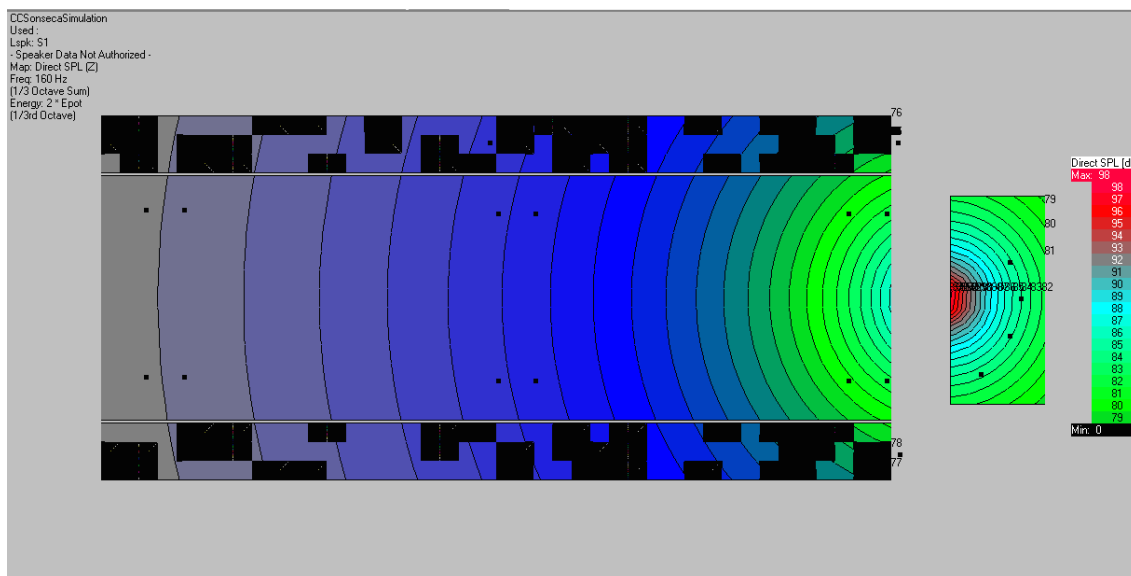


Fig. 2.3 Mapping direct SPL 160 Hz

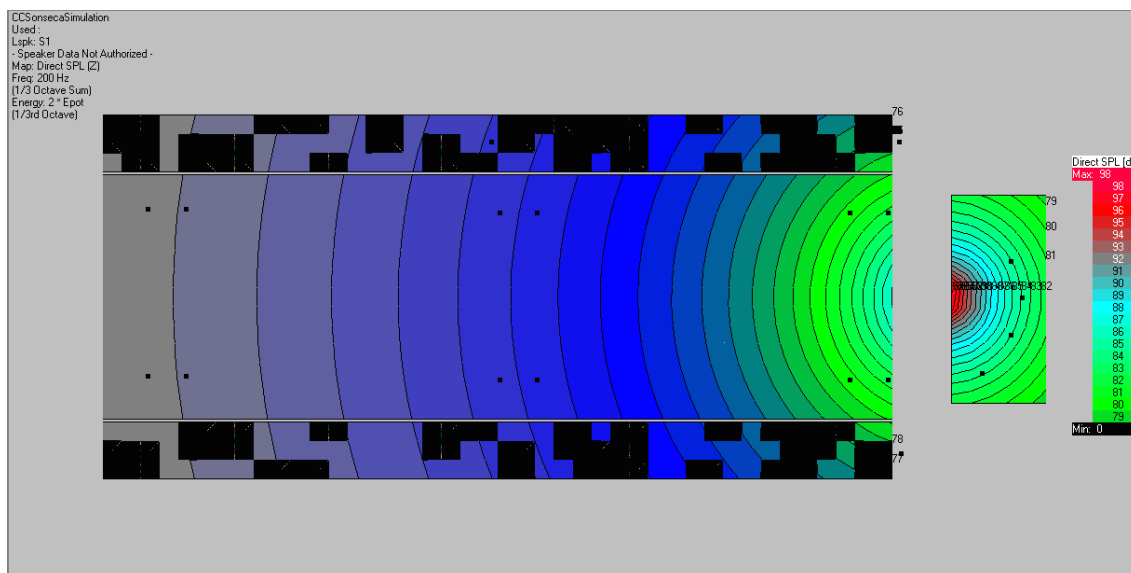


Fig. 2.4 Mapping direct SPL 200 Hz

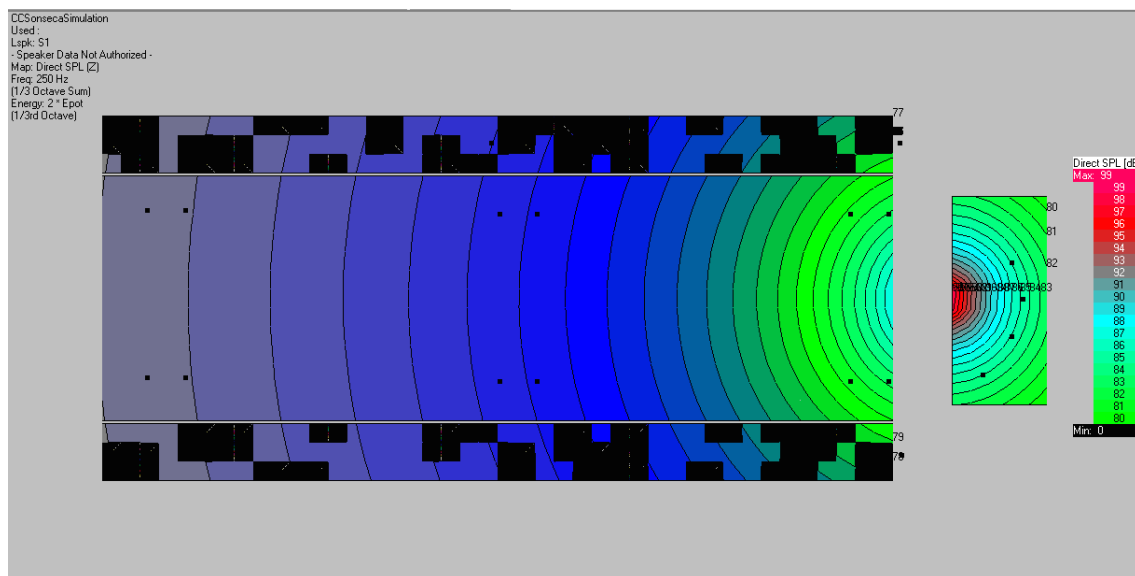


Fig. 2.5 Mapping direct SPL 250 Hz

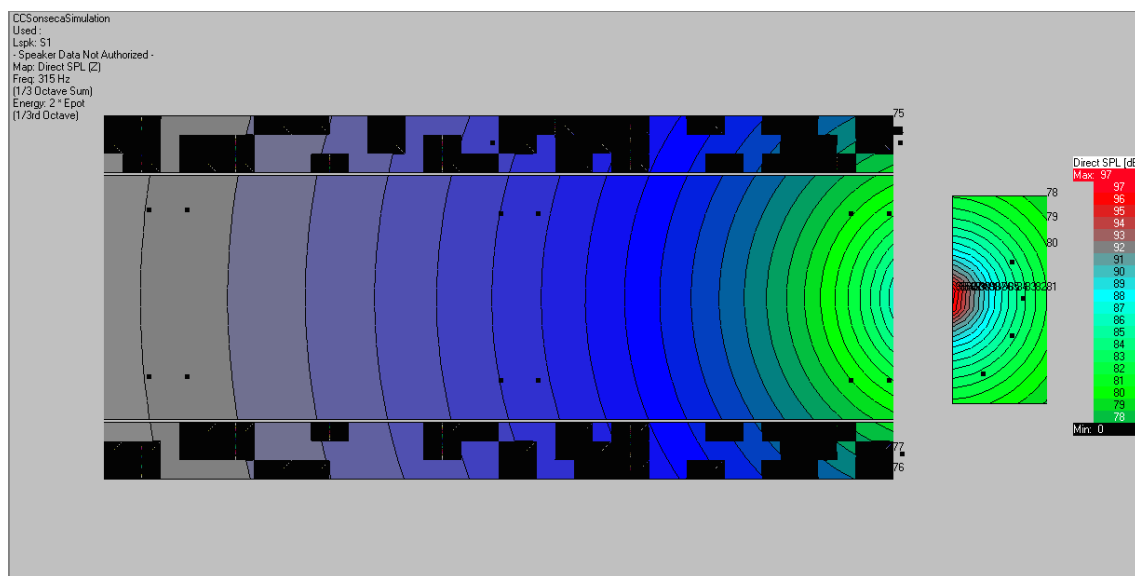


Fig. 2.6 Mapping direct SPL 315 Hz

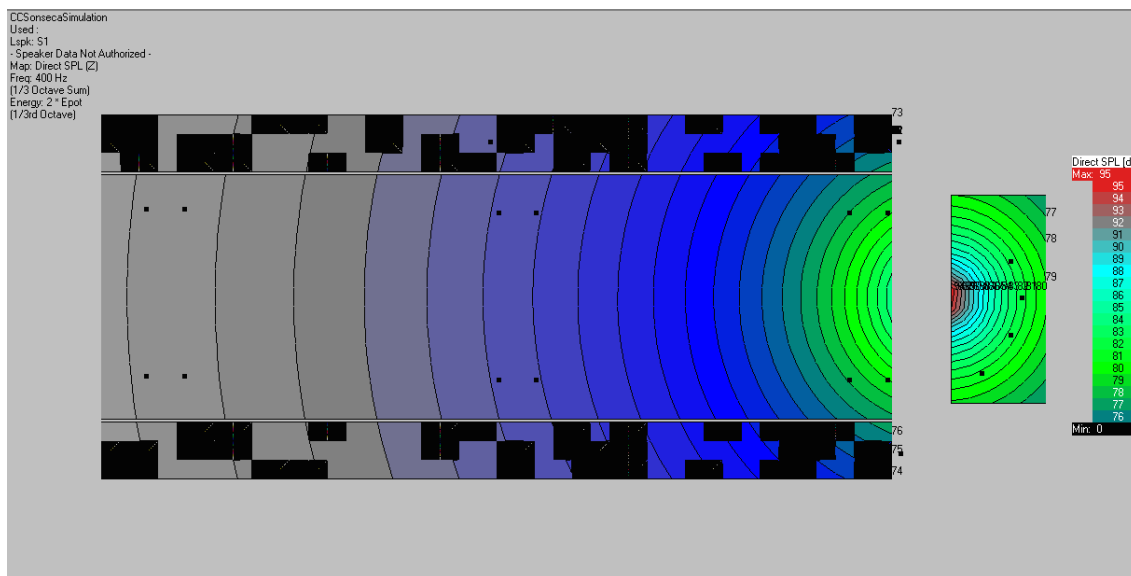


Fig. 2.7 Mapping direct SPL 400 Hz

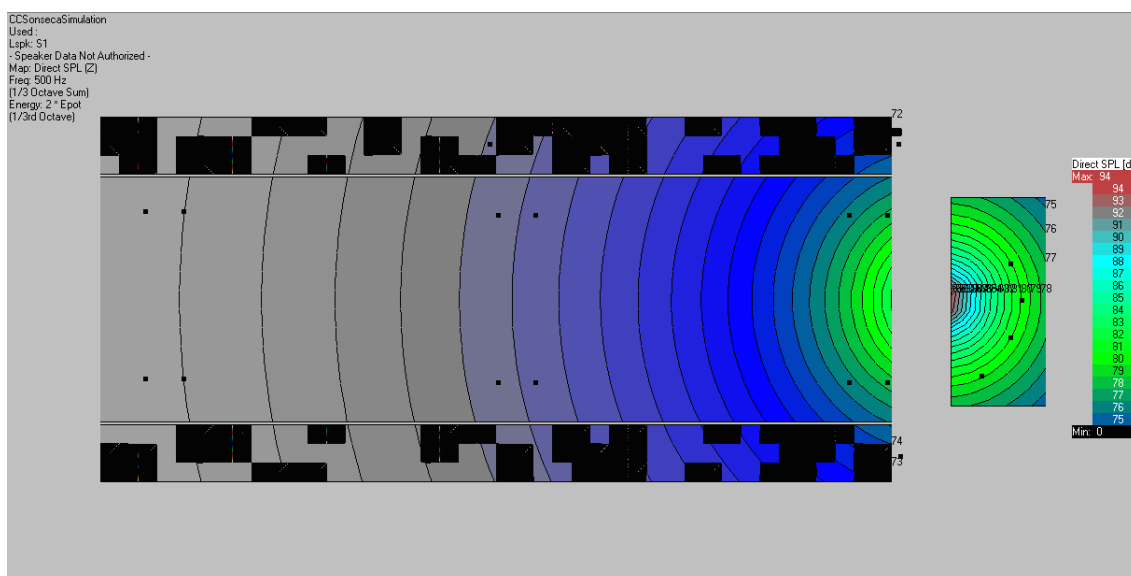


Fig. 2.8 Mapping direct SPL 500 Hz

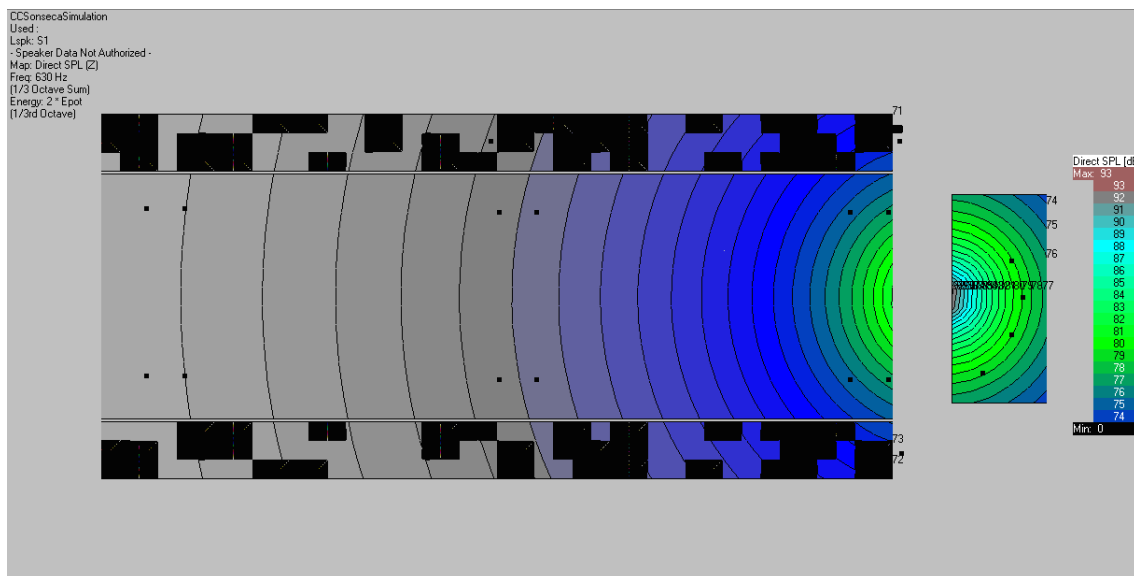


Fig. 2.9 Mapping direct SPL 630 Hz

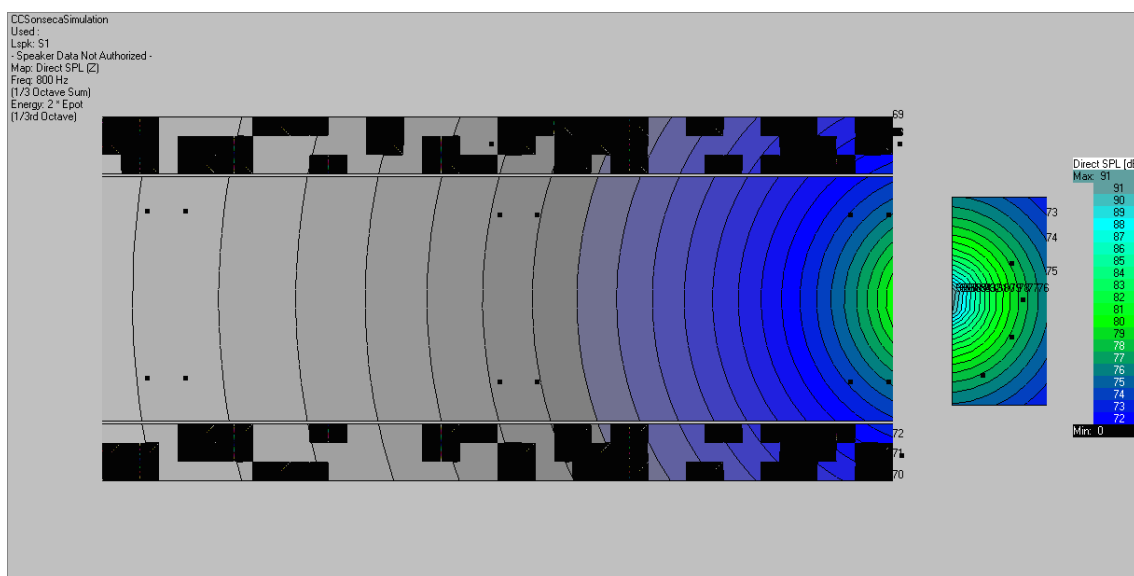


Fig. 2.10 Mapping direct SPL 800 Hz

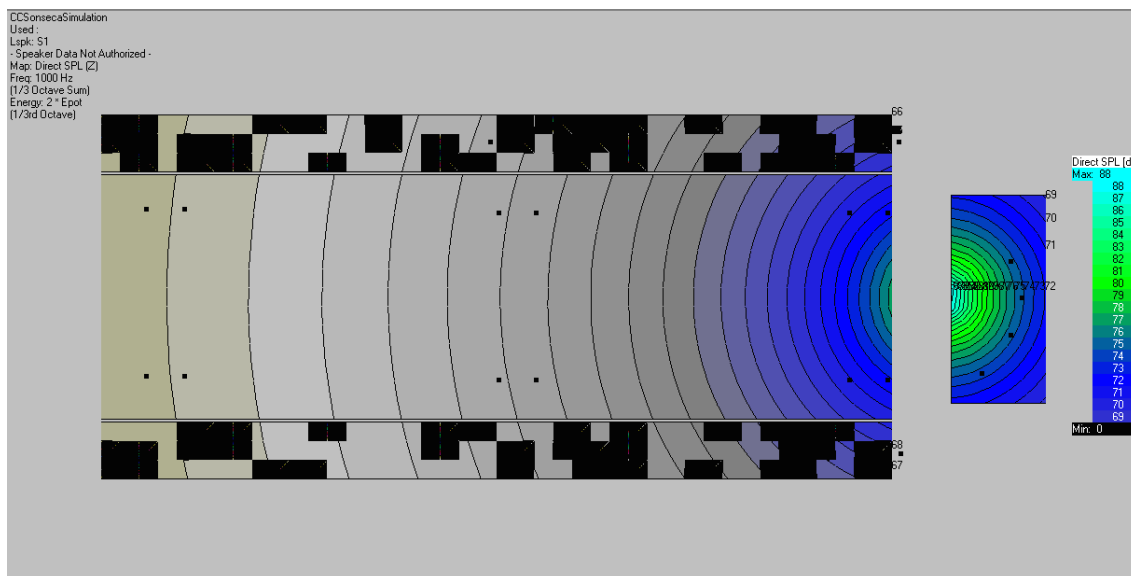


Fig. 2.11 Mapping direct SPL 1000 Hz

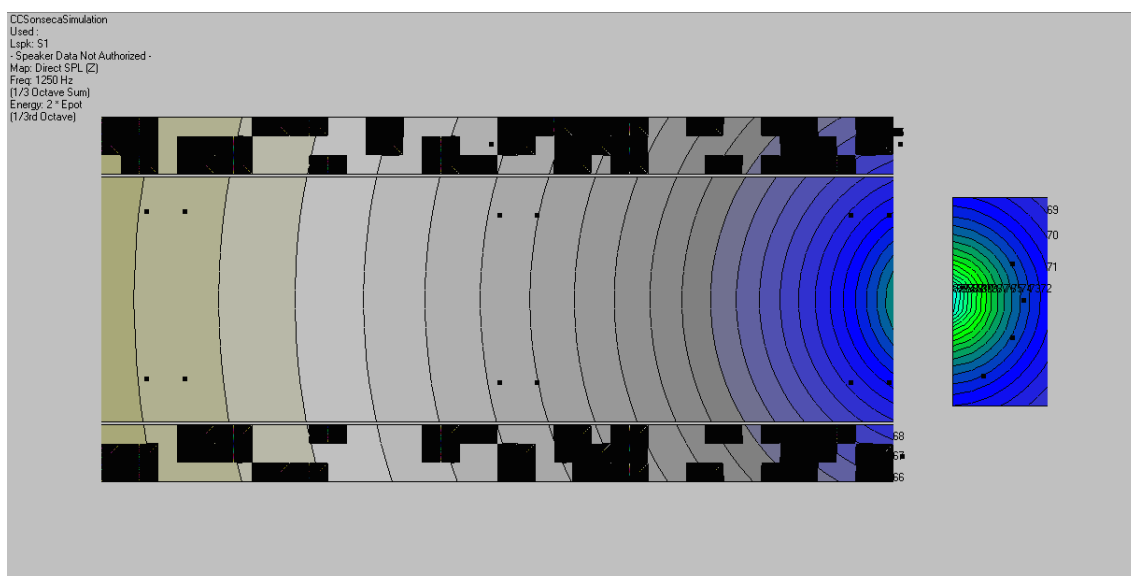


Fig. 2.12 Mapping direct SPL 1250 Hz

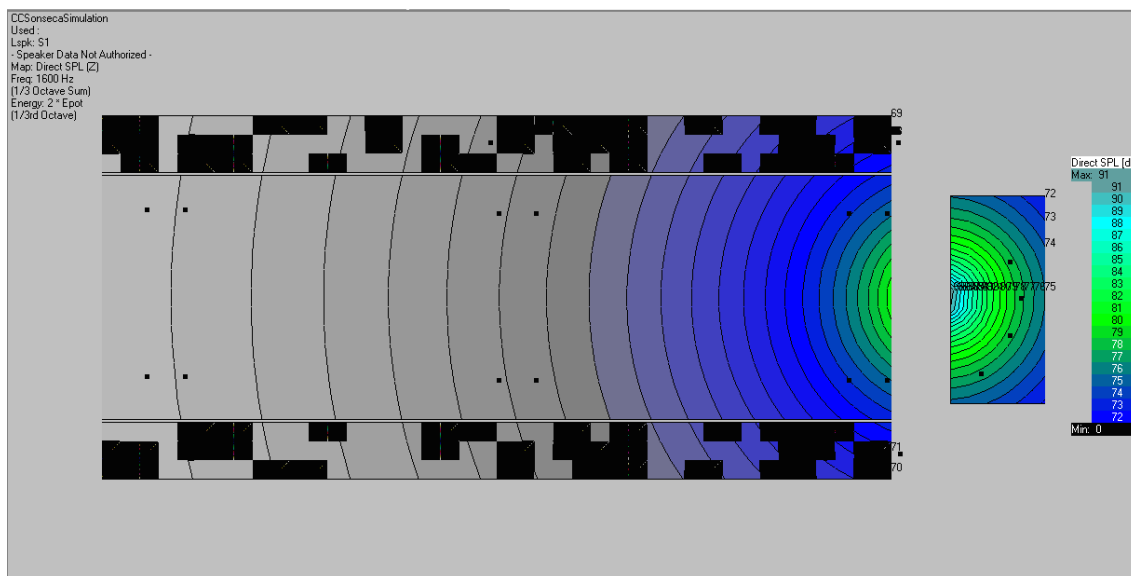


Fig. 2.13 Mapping direct SPL 1600 Hz

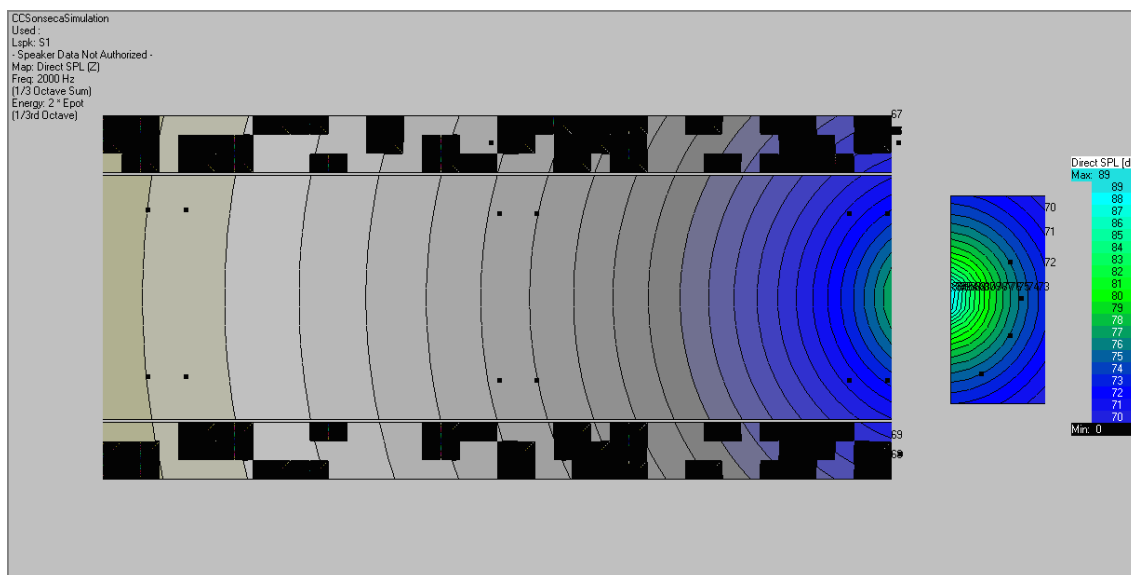


Fig. 2.14 Mapping direct SPL 2000 Hz

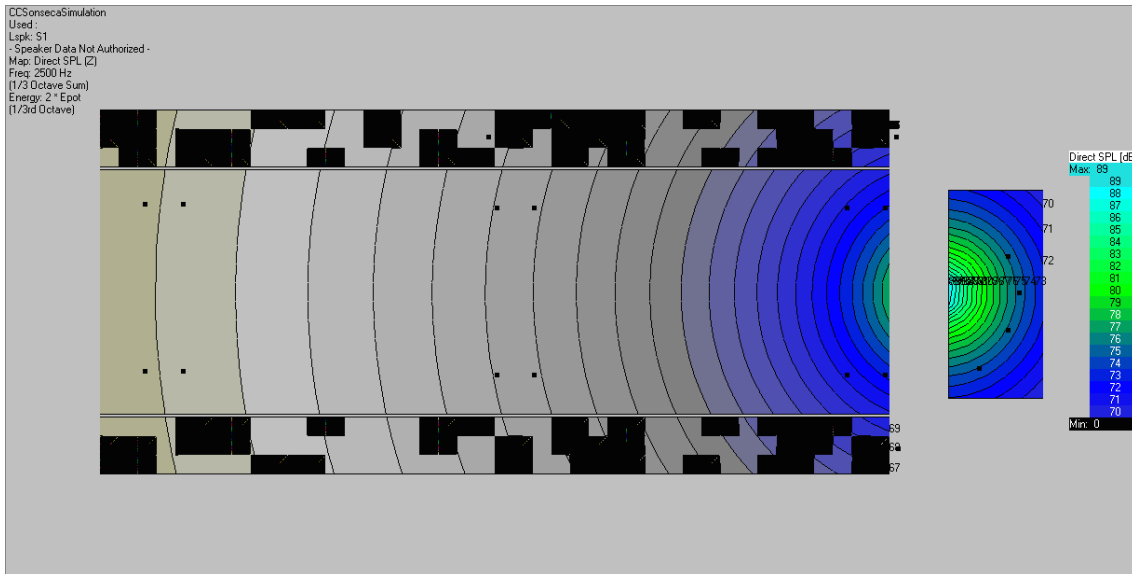


Fig. 2.15 Mapping direct SPL 2500 Hz

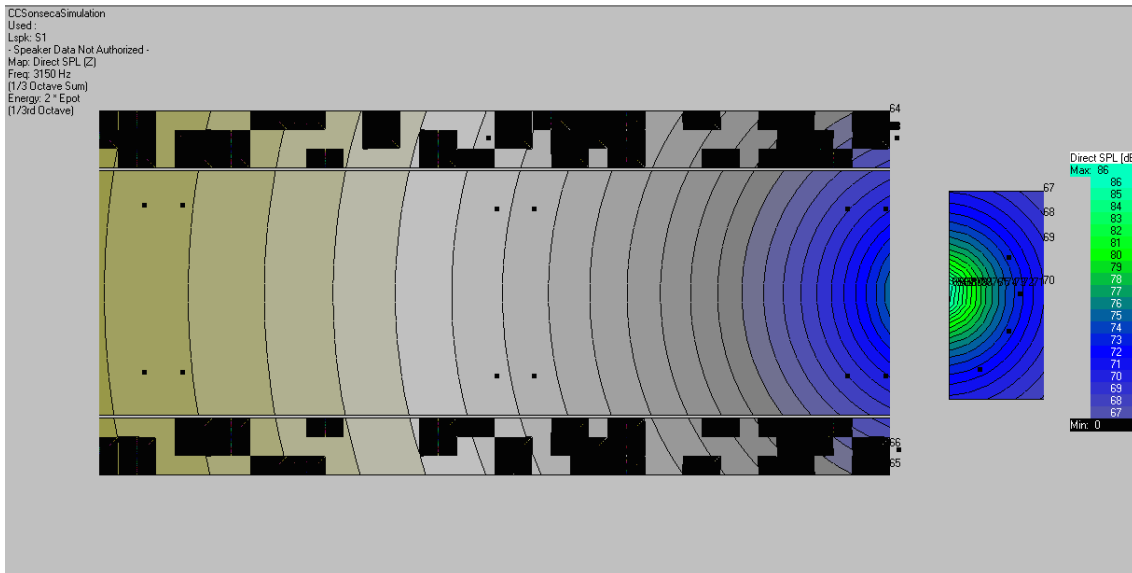


Fig. 2.16 Mapping direct SPL 3150 Hz

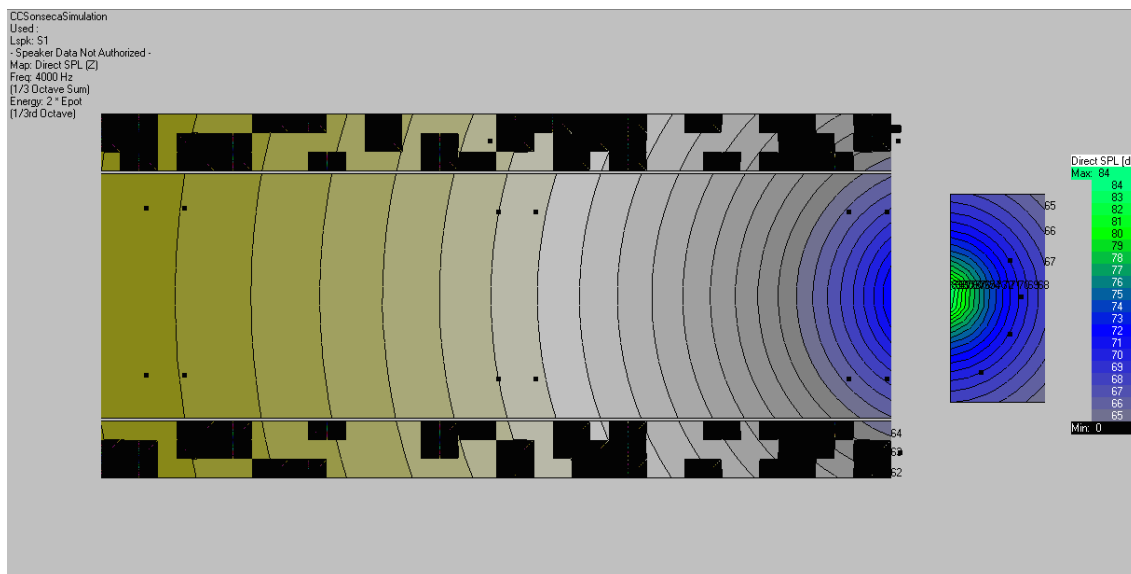


Fig. 2.17 Mapping direct SPL 4000 Hz

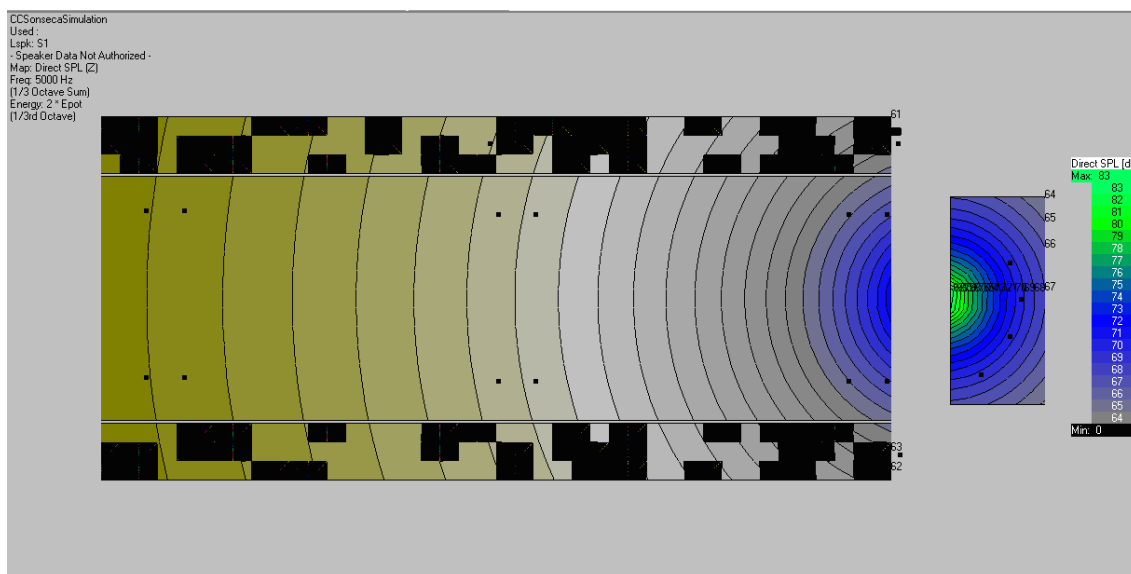


Fig. 2.18 Mapping direct SPL 5000 Hz

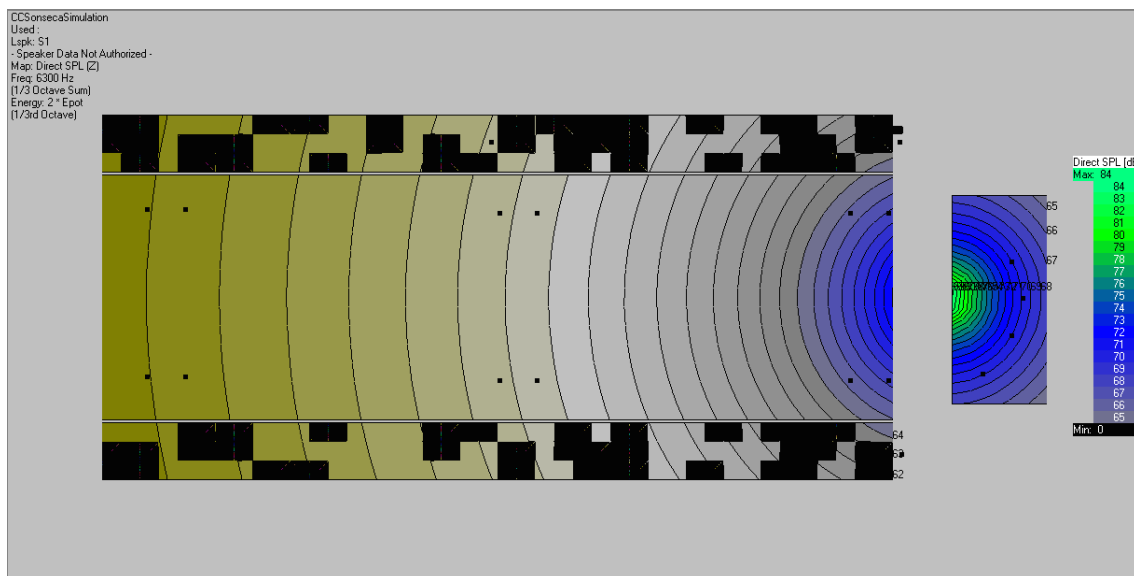


Fig. 2.19 Mapping direct SPL 6300 Hz

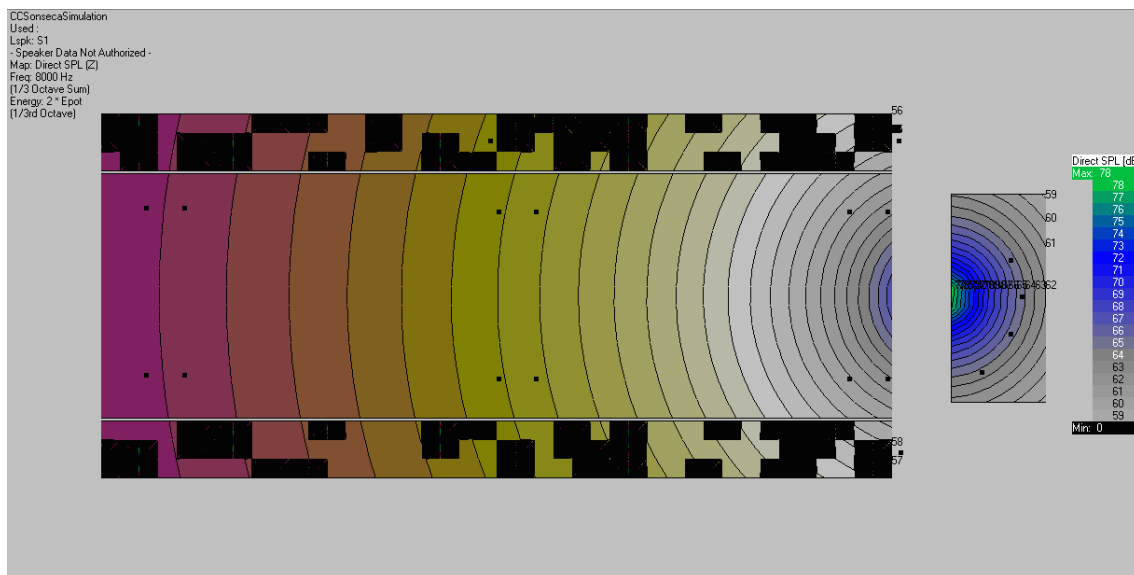


Fig. 2.20 Mapping direct SPL 8000 Hz

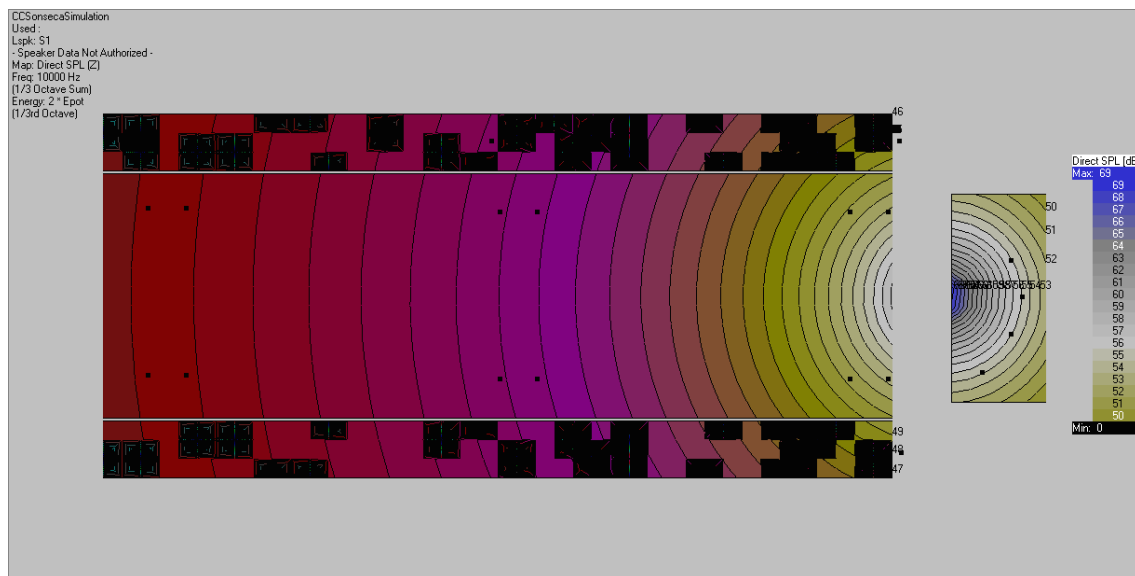
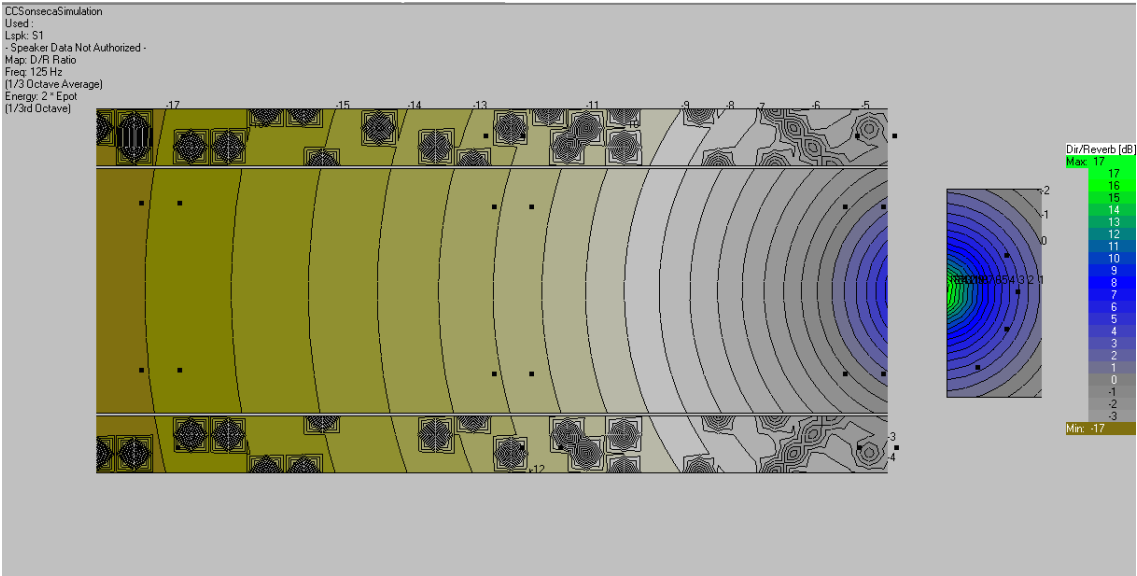
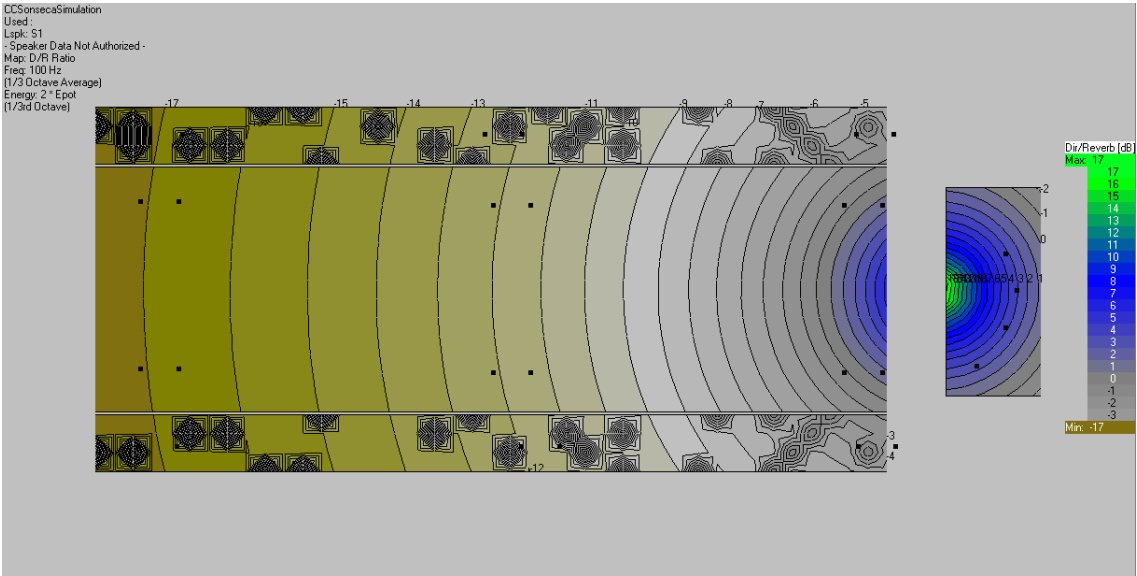


Fig. 2.21 Mapping direct SPL 10000 Hz

3. D/R



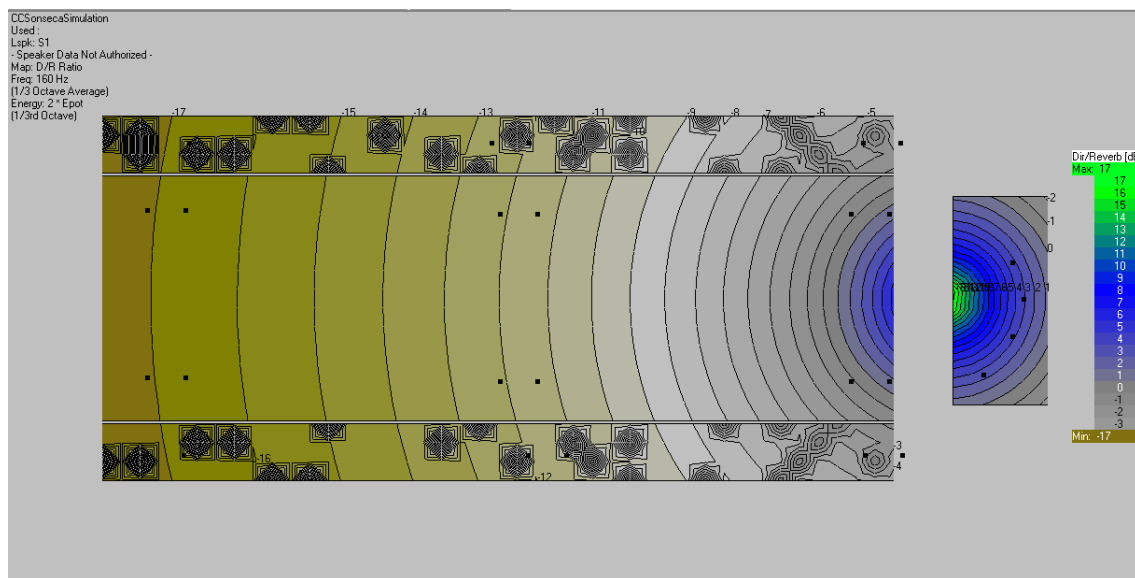


Fig. 3.3 D/R ratio 160 Hz

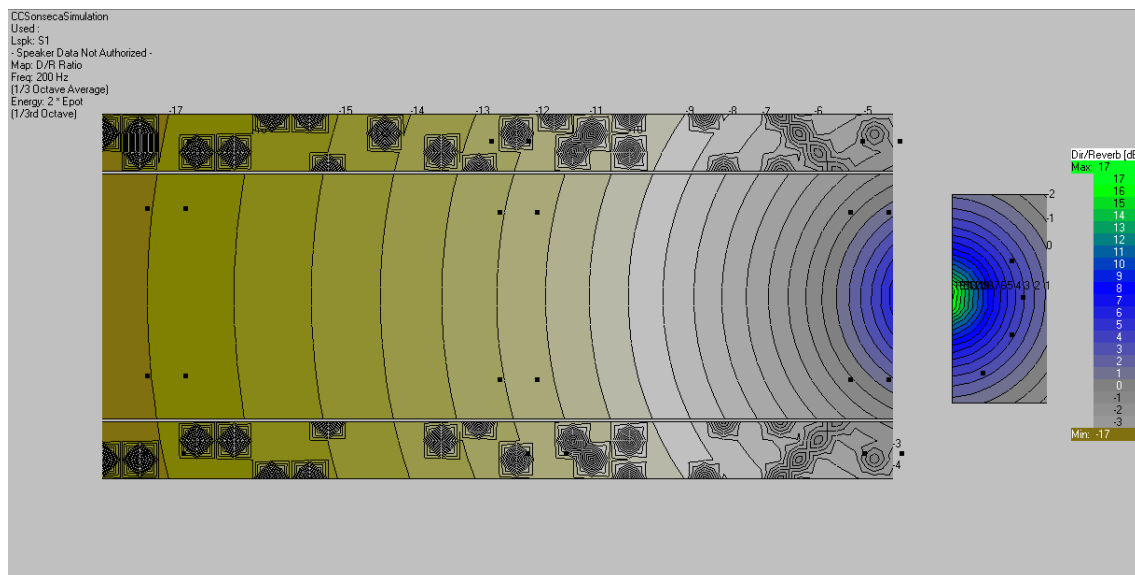


Fig. 3.4 D/R ratio 200 Hz

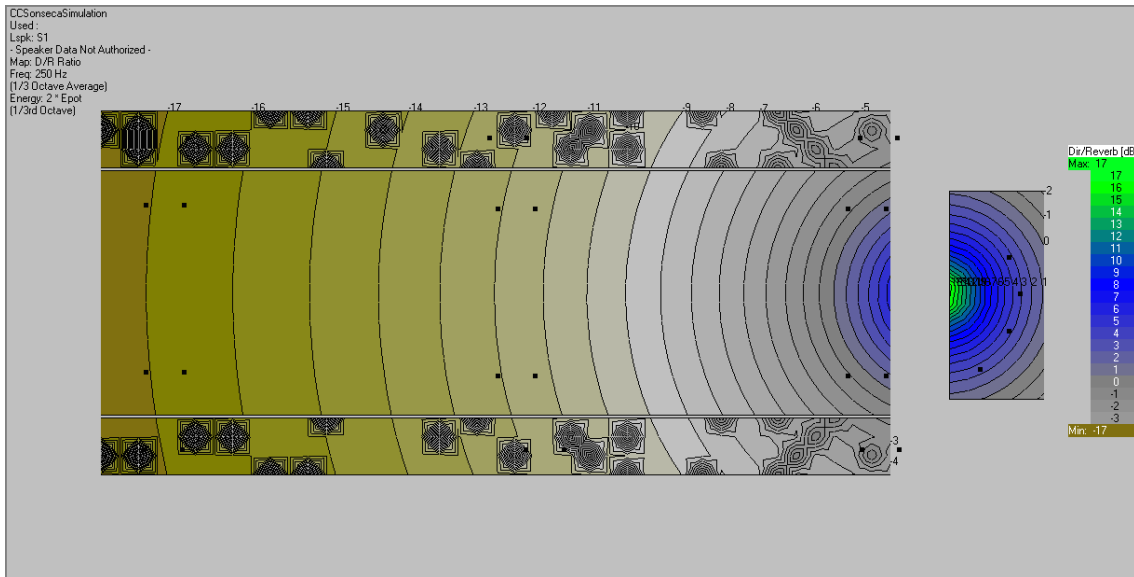


Fig. 3.5 D/R ratio 250 Hz

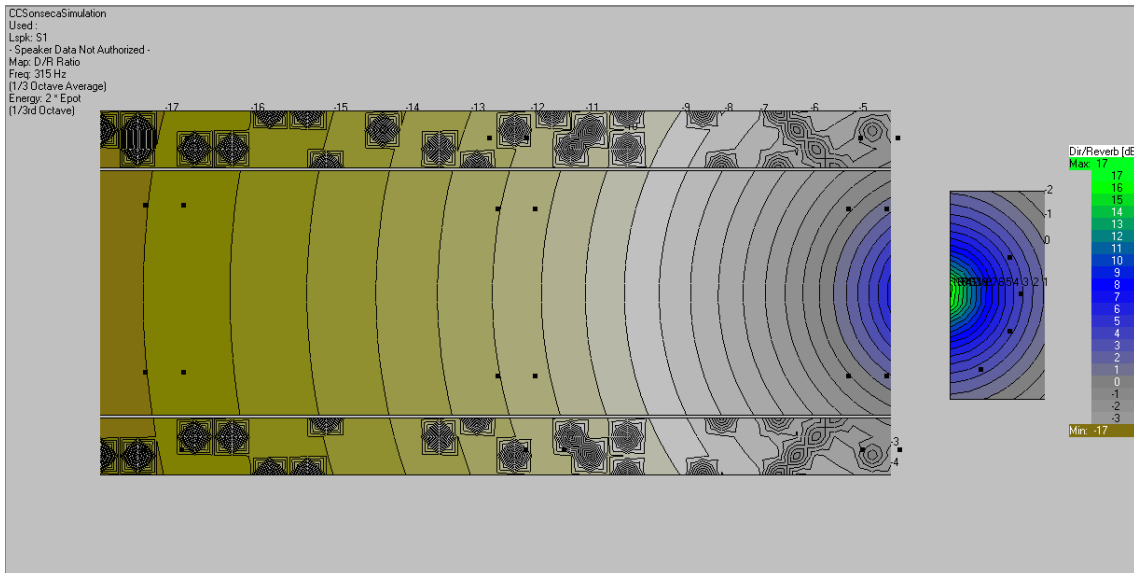


Fig. 3.6 D/R ratio 315 Hz

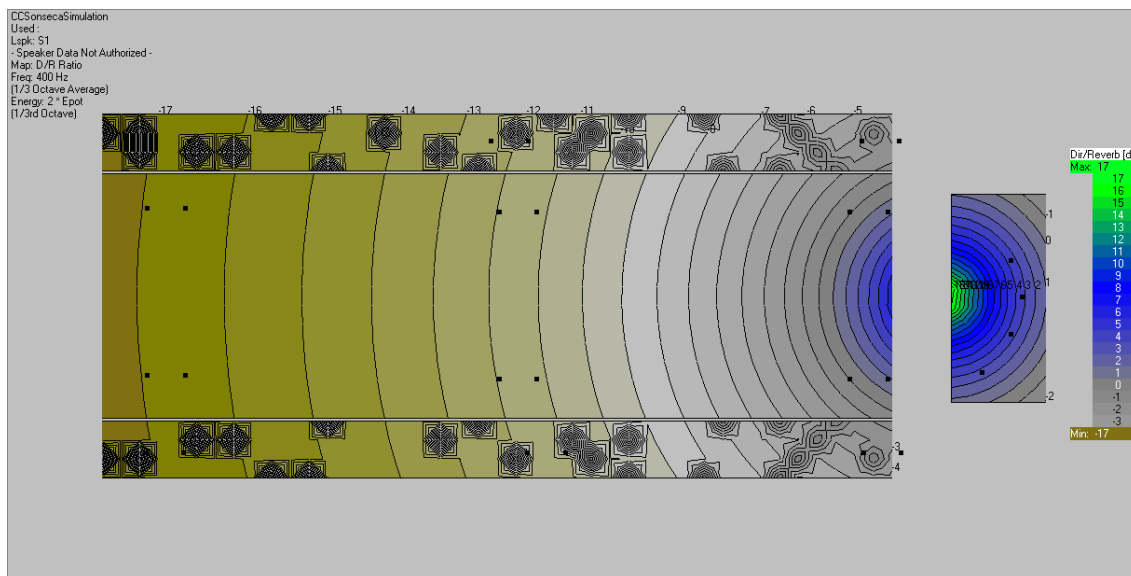


Fig. 3.7 D/R ratio 400 Hz

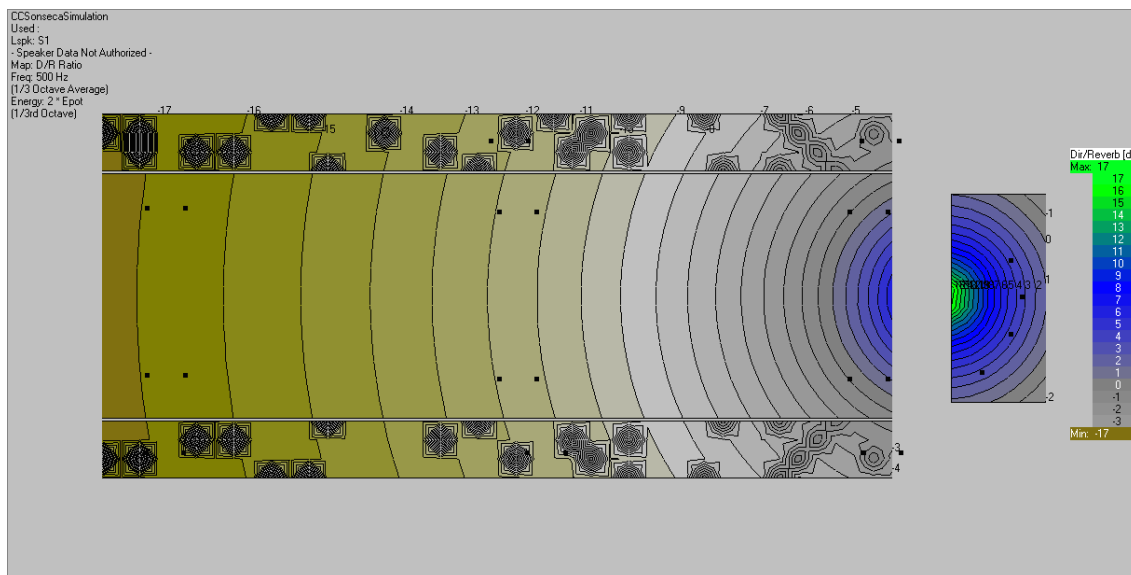


Fig. 3.8 D/R ratio 500 Hz

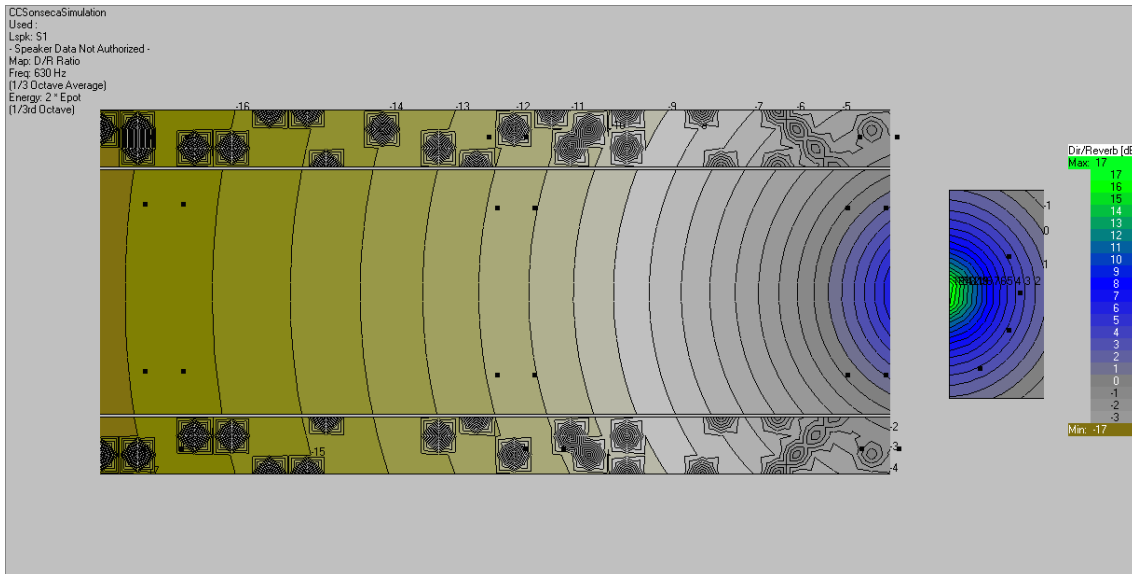


Fig. 3.9 D/R ratio 630 Hz

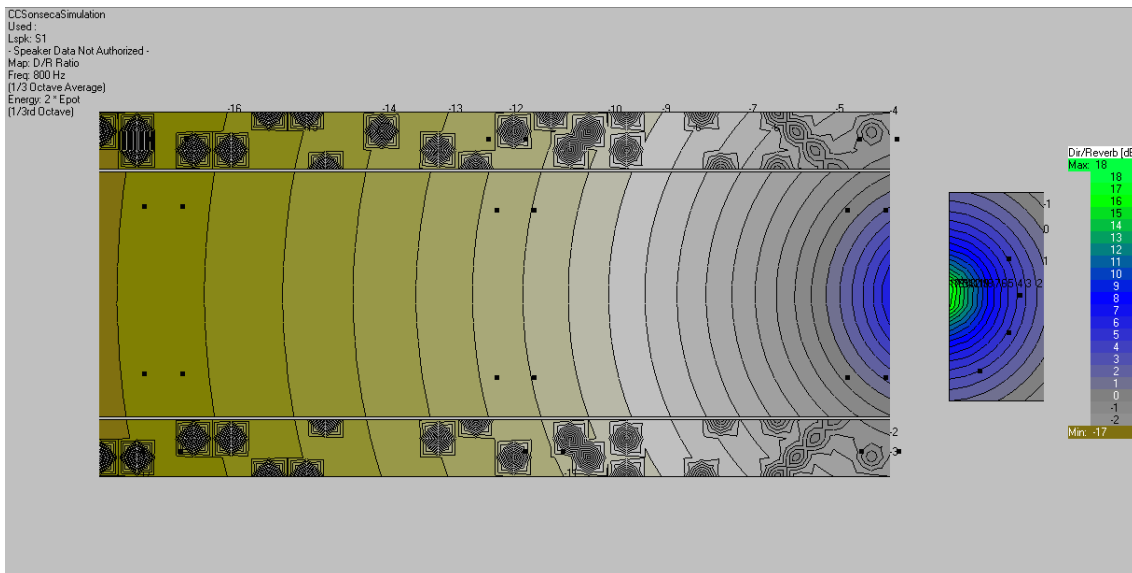


Fig. 3.10 D/R ratio 800 Hz

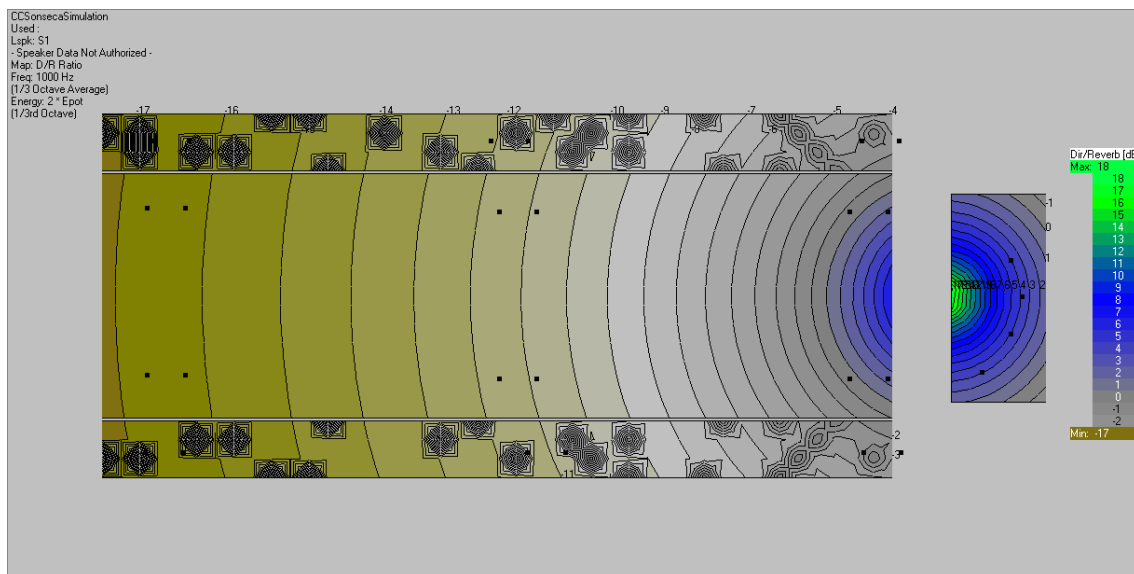


Fig. 3.11 D/R ratio 1000 Hz

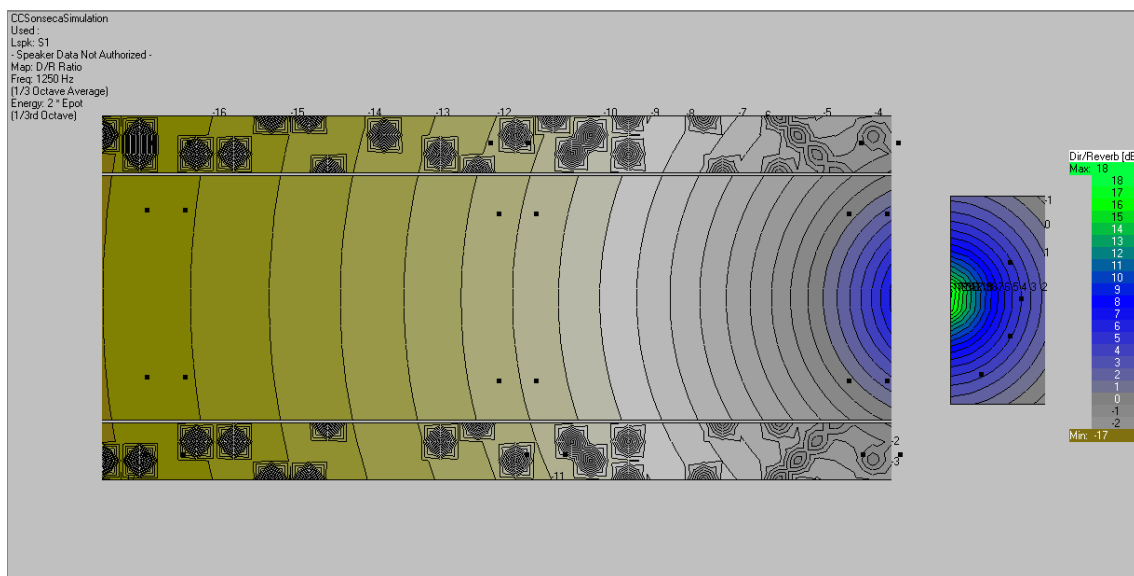


Fig. 3.12 D/R ratio 1250 Hz

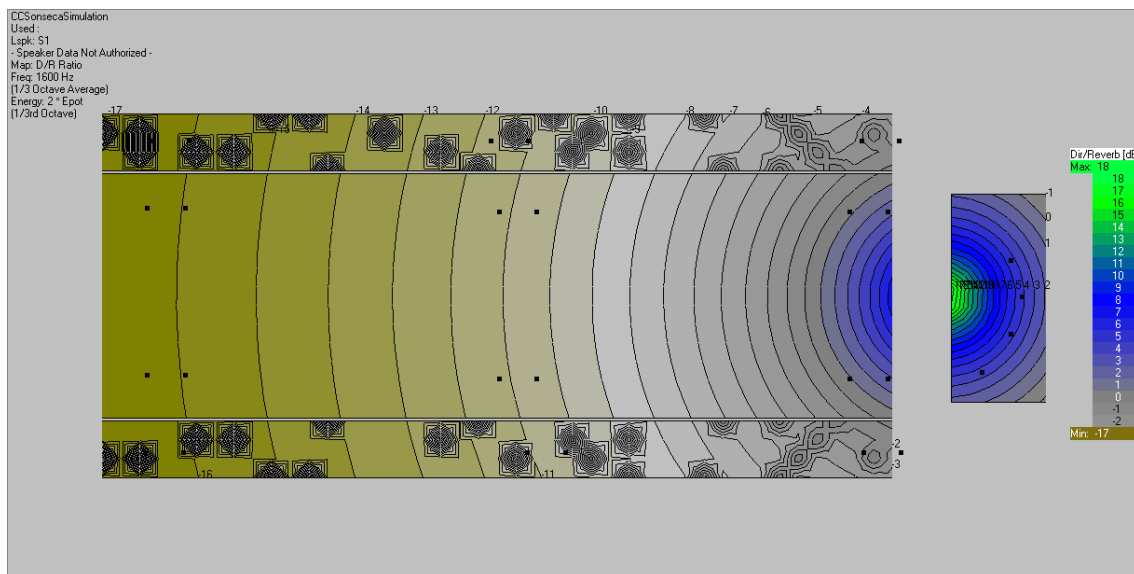


Fig. 3.13 D/R ratio 1600 Hz

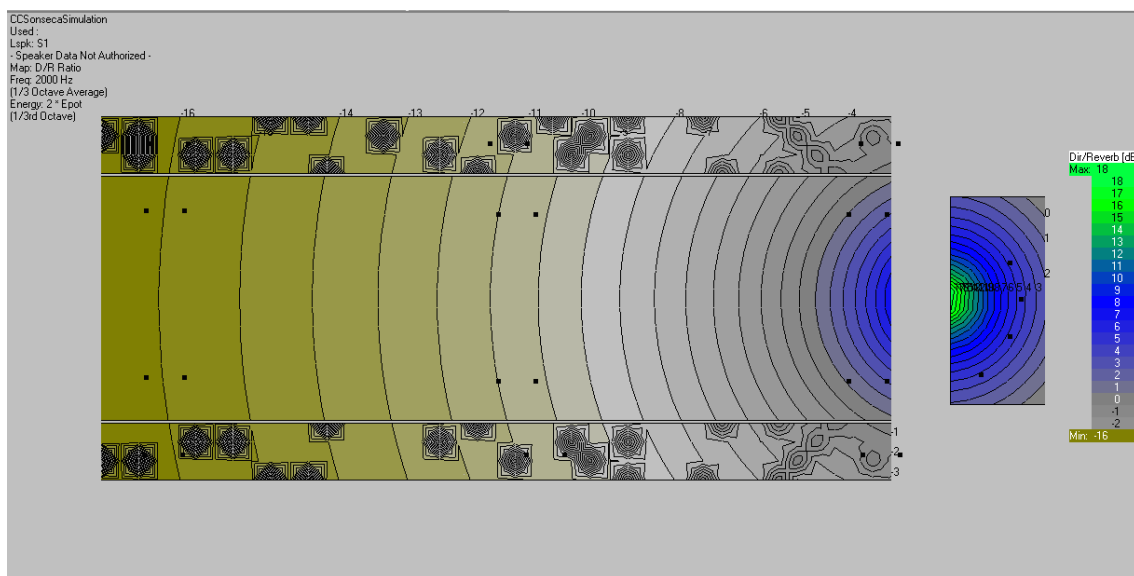


Fig. 3.14 D/R ratio 2000 Hz

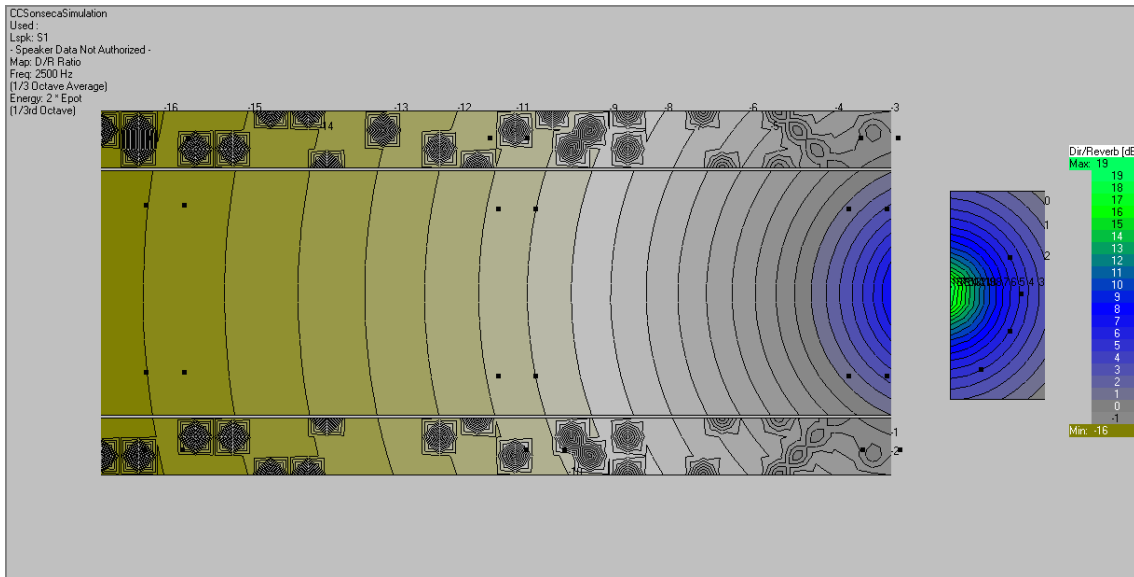


Fig. 3.15 D/R ratio 2500 Hz

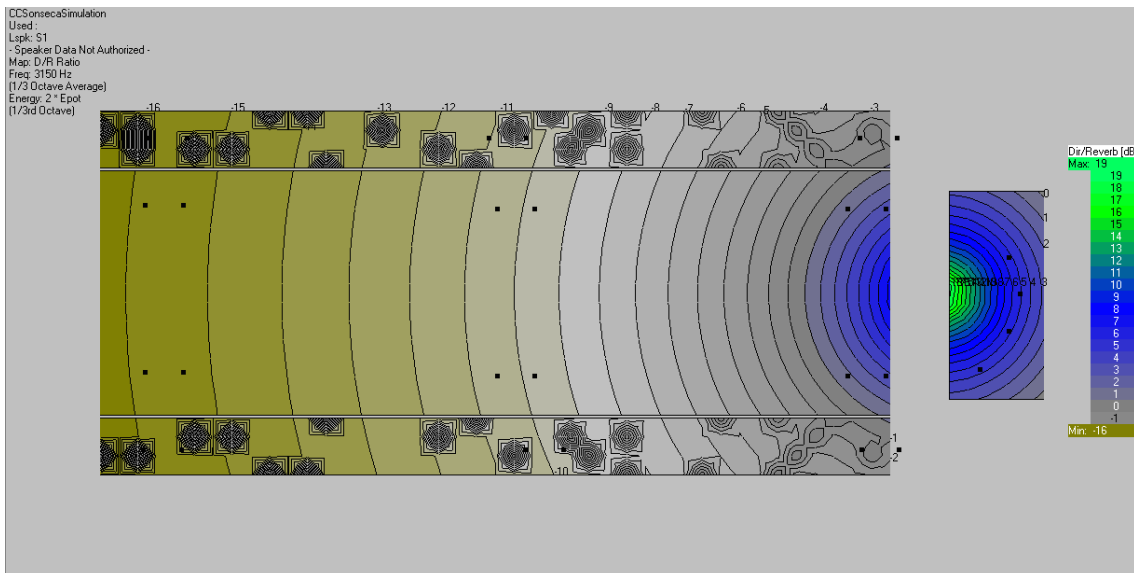


Fig. 3.16 D/R ratio 3150 Hz

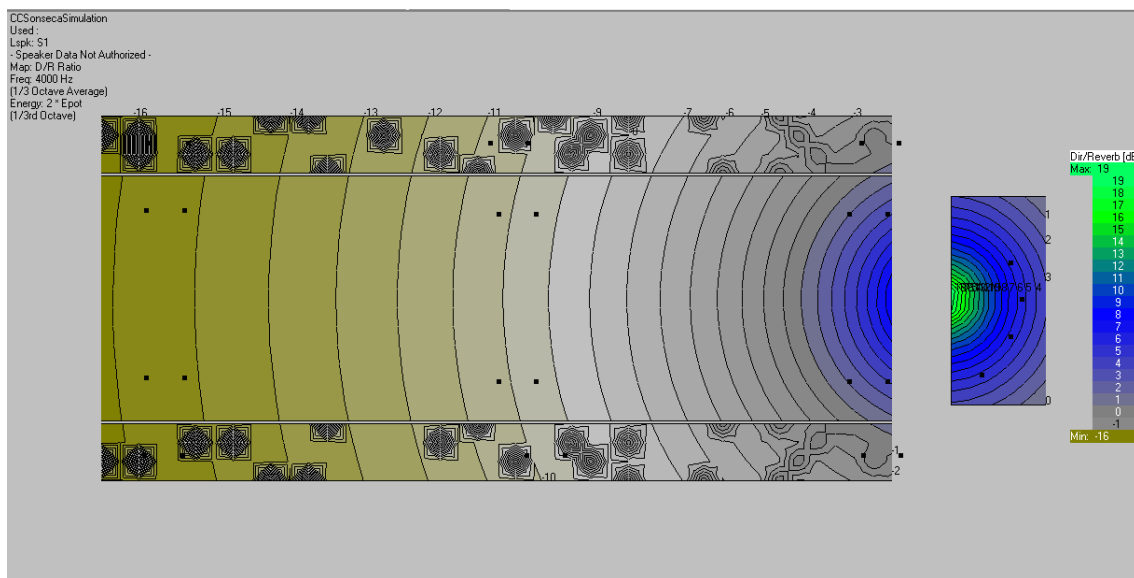


Fig. 3.17 D/R ratio 4000 Hz

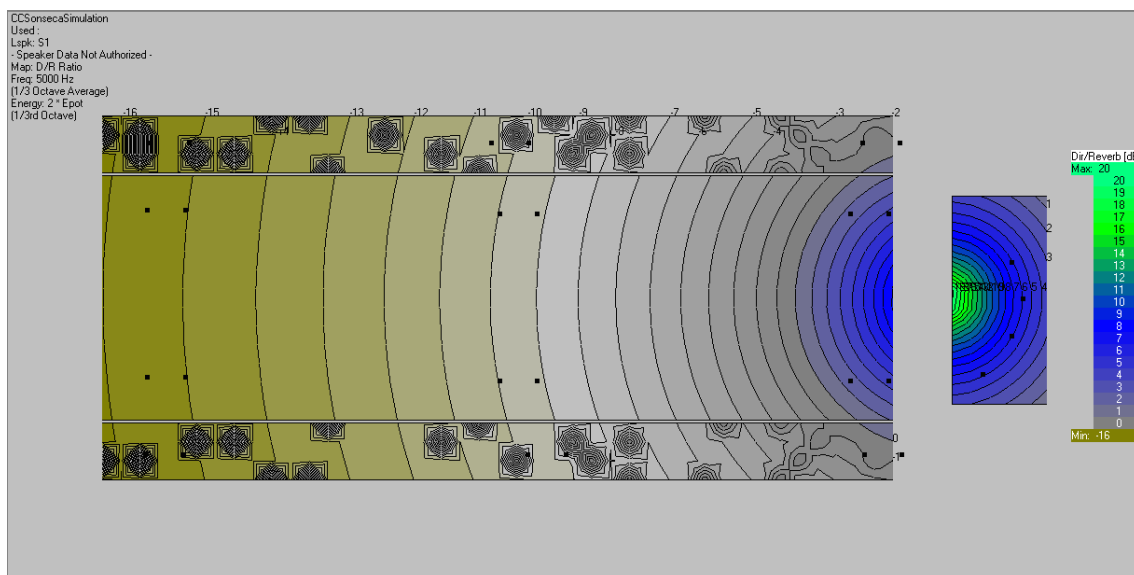


Fig. 3.18 D/R ratio 5000 Hz

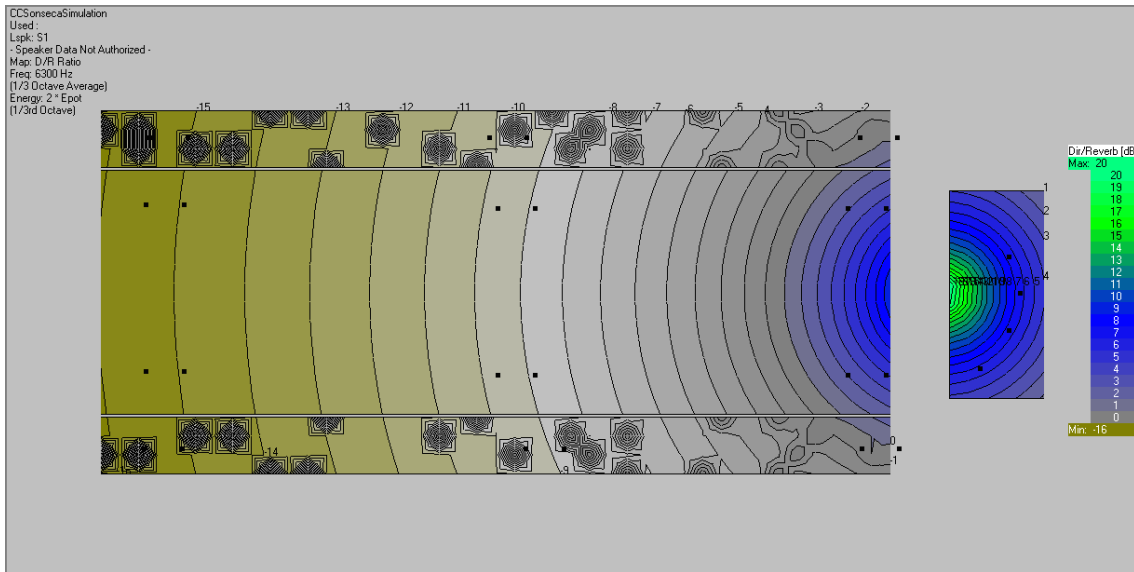


Fig. 3.19 D/R ratio 6300 Hz

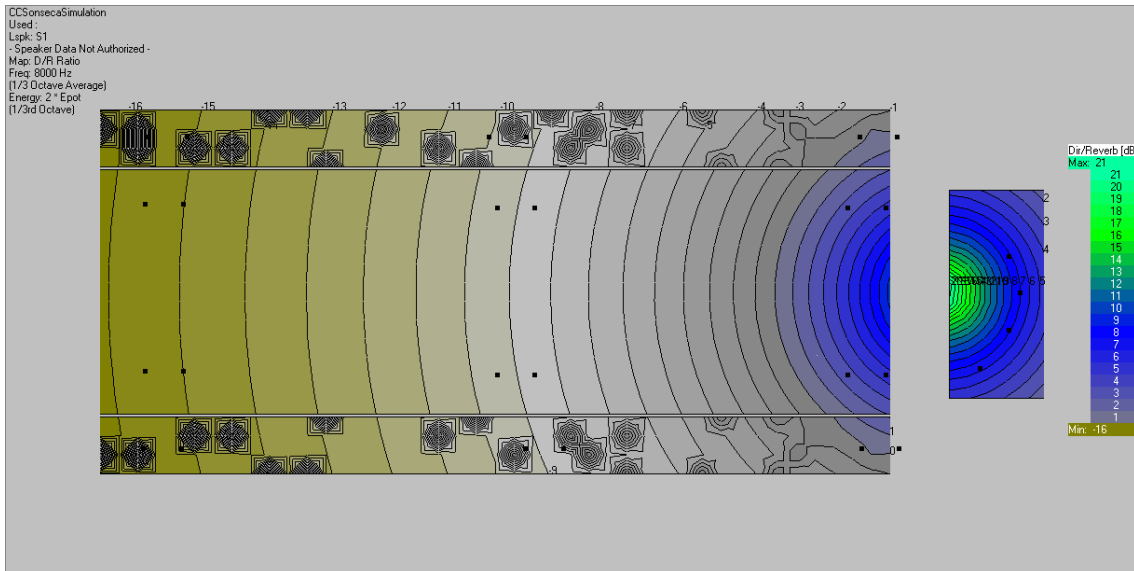


Fig. 3.20 D/R ratio 8000 Hz

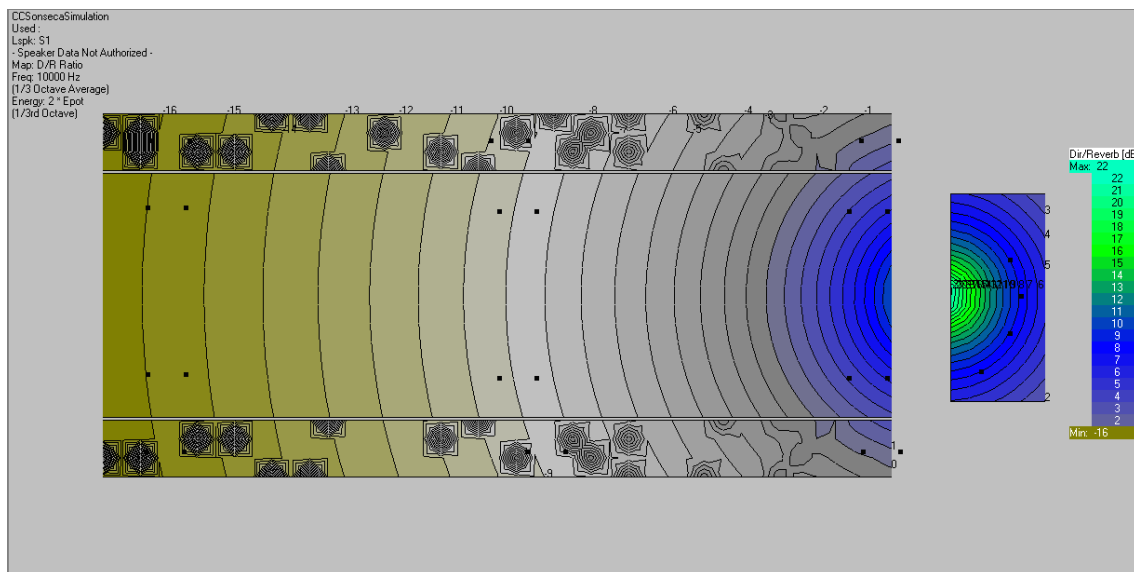


Fig. 3.21 D/R ratio 10000 Hz

4. %ALCons

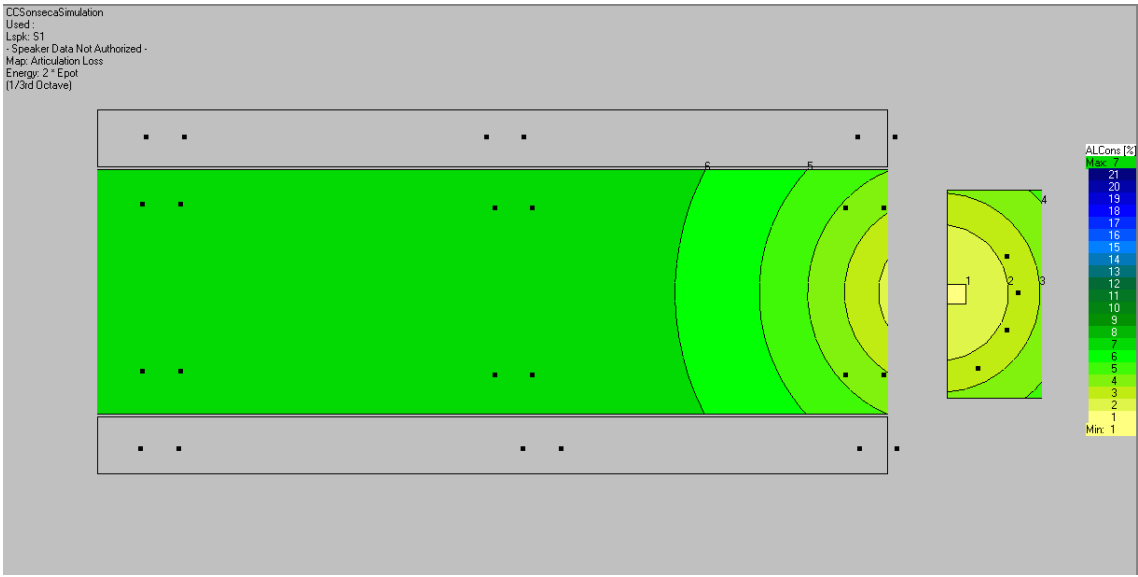


Fig. 4.1 Map Articulation Loss